ФИЗИКА В 100 ПАРАГРАФАХ

- МЕХАНИКА
- МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА
- ЭЛЕКТРОДИНАМИКА
- ОПТИКА
- АТОМ И АТОМНОЕ ЯДРО

СОДЕРЖАНИЕ

ВСТУПЛЕНИЕ

§1 ФИЗИКА КАК НАУКА

Физика — это наука, изучающая наиболее общие закономерности явлений природы, свойства, строение материи и законы ее движения. Законы физики являются основой для всех естественных наук.

Материя — это все то, что нас окружает. Вселенная состоит из разных видов материи — **вещества** и **поля**. Недавно были открыты *темная материя* и *темная энергия*, природа которых пока точно не установлена.

Физическое тело — это объект из вещества, имеющий внешнюю границу. Все физические тела «построены» из вещества.

Изменения в природе называют **природными явлениями** (рис. 1).

Механические явления — это явления, происходящие с физическими телами при их движении относительно друг друга (обращение Земли вокруг Солнца, движение автомобилей, качание маятника).

Магнитные явления — это явления, связанные с возникновением у физических тел магнитных свойств (притяжение магнитом железных предметов, поворот стрелки компаса на север).

Электрические явления — это явления, возникающие при появлении, существовании, движении и взаимодействии электрических зарядов (электрический ток, молния).

Оптические (световые) явления — это явления, возникающие при распространении, преломлении и отражении света (отражение света от зеркала, солнечные и лунные затмения, радуга).

Тепловые явления — это явления, связанные с нагреванием и охлаждением физических тел (кипение чайника, образование тумана, превращение воды в лед).

Атомные явления — это явления, возникающие при изменении внутреннего строения вещества физических тел (свечение Солнца и звезд, атомный взрыв).



Рис. 1

Сложные природные явления рассматривают как **совокупность физических явлений** — таких, которые можно описать с помощью физических законов.

§2 НАУЧНЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРИРОДЫ

Наблюдение — это восприятие природы с целью получения первичных данных для последующего анализа.

Физическое исследование — это целенаправленное изучение явлений и свойств природы средствами физики.

МЕТОДЫ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ	
Экспериментальный	**Теоретический**
Эксперимент (опыт) — исследование физического явления в условиях, находящихся под контролем исследователя. Эксперименты обычно сопровождаются *измерениями*. В своей основе физика является экспериментальной наукой: большинство ее законов основаны на фактах, установленных опытным путем.	Анализ данных, полученных в результате экспериментов, формулирование законов природы, объяснение конкретных явлений и свойств на основе этих законов, а главное — предвидение и теоретическое обоснование (с широким использованием математики) еще не известных явлений и свойств.

На определенном этапе ученые имеют *некие знания*; в результате *наблюдений* и *размышлений* они убеждаются в необходимости усовершенствования этих знаний; затем ученые проводят *теоретические исследования*, выдвигают *гипотезу* и подтверждают (или опровергают) ее путем *экспериментальной проверки*. Результатом становится *новое знание*.

Перед проведением теоретических исследований физического процесса ученые создают его идеализированный аналог — **физическую модель**.

§3 ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ИХ ИЗМЕРЕНИЕ

Физическая величина — это количественно выраженная характеристика тела или физического явления.

Кратные единицы — это единицы, которые больше основных единиц в 10, 100, 1000 и более раз.

Дольные единицы — это единицы, которые меньше основных единиц в 10, 100, 1000 и более раз.

Префиксы к единицам СИ

Наименование	Обозначение	Множитель
тера	Т	10^{12}
гига	Г	10^{9}
мега	М	10^{6}
кило	к	10^{3}
гекто	г	10^{2}
дека	да	10^{1}

Наименование	Обозначение	Множитель
деци	д	10^{-1}
санти	с	10^{-2}
милли	м	10^{-3}
микро	мк	10^{-6}
нано	н	10^{-9}
пико	п	10^{-12}

Измерить физическую величину означает сравнить ее с однородной величиной, взятой за единицу.

Числовое значение и единицы физической величины образуют *значение физической величины*.

Значение физической величины устанавливают в ходе измерений, которые, в свою очередь, бывают **прямые** и **косвенные**.

При *прямых измерениях* величину сравнивают с ее единицей с помощью измерительного прибора, проградуированного в соответствующих единицах.

При *косвенных измерениях* величину вычисляют по

результатам прямых измерений других величин, связанных с измеряемой величиной некоторой функциональной зависимостью.

Для установления значений физических величин в ходе прямых измерений используют *измерительные приборы*.

Цена деления шкалы измерительного прибора — это значение наименьшего деления шкалы данного прибора. Чтобы определить цену деления C шкалы измерительного прибора, необходимо разность двух любых ближайших значений величины $|d_1 - d_2|$, приведенных на шкале, разделить на количество делений N между ними:

$$C = \frac{|d_1 - d_2|}{N}$$

Пределы измерения прибора — это наибольшее и наименьшее значения физической величины, которые можно измерить данным прибором.

§4 ПОГРЕШНОСТИ И ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерение невозможно провести с абсолютной точностью. Погрешности в ходе измерения физических величин связаны как с процессами измерения, так и с выбором прибора для измерения. Чтобы уменьшить погрешность, одни и те же измерения выполняют несколько раз, а потом вычисляют среднее значение результатов измерения.

Погрешности измерений — отклонение значения измеренной величины от ее истинного значения.

Погрешности при измерениях бывают случайные и систематические.

Случайные погрешности связаны с процессом измерения. Чтобы результаты были более точными, измерения проводят несколько раз и определяют среднее значение измеряемой величины:

$$x_{\text{изм}} = x_{\text{ср}} = \frac{x_1 + x_2 + \ldots + x_N}{N},$$

где x_1, x_2, ... x_N — результаты каждого из N измерений.

Случайная абсолютная ошибка ($\Delta x_{\text{случ}}$) — средняя ошибка, полученная в результате всех измерений, — вычисляется по формуле:

$$\Delta x_{\text{случ}} = \sqrt{\frac{(x_1 - x_{\text{ср}})^2 + (x_2 - x_{\text{ср}})^2 + \ldots + (x_N - x_{\text{ср}})^2}{N}}$$

Различают *абсолютную* и *относительную погрешности*.

Абсолютная погрешность результата измерения показывает, на сколько максимально может ошибиться исследователь, правильно измеряя физическую величину. Чтобы правильно оценить точность эксперимента, необходимо учитывать как систематическую погрешность, обусловленную прибором ($\Delta x_{\text{приб}}$), так и случайную погрешность ($\Delta x_{\text{случ}}$), обусловленную ошибками измерений. Эту суммарную ошибку называют *абсолютной погрешностью измерения* (Δx) и определяют по формуле:

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x_{\text{приб}})^2 + (\Delta x_{\text{случ}})^2}$$

Насколько точно проведено измерение, более наглядно показывает *относительная погрешность*. Отношение абсолютной погрешности Δx к измеренному значению измеряемой величины $x_{\text{изм}}$ называют **относительной погрешностью измерения** ε_x:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{изм}}}$$, или в процентах: $$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{изм}}} \cdot 100\ \%$$

Систематические погрешности связаны прежде всего с выбором прибора. Систематические погрешности определяются классом точности прибора, поэтому их часто называют *погрешностями прибора*.

Окончательный результат для значения величины x записывается в виде:

$$x = x_{\text{изм}} \pm \Delta x$$

Здесь $x = x_{\text{изм}} + \Delta x$ — *наибольшее вероятное значение* измеряемой величины, а $x = x_{\text{изм}} - \Delta x$ — ее *наименьшее вероятное значение* (рис. 2).

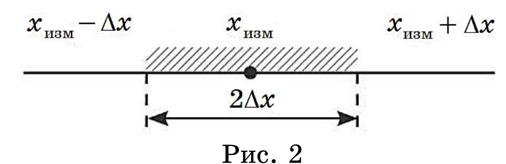


Рис. 2

Обработку результатов эксперимента также можно представить в виде графика.

РАЗДЕЛ I. МЕХАНИКА

ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ

§5 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ КИНЕМАТИКИ

Механика — наука, изучающая механическое движение тел и взаимодействия между телами.

Основная задача механики — познать законы механического движения и взаимодействия материальных тел, на основе этих законов предвидеть поведение тел и определять их механическое состояние (координаты и скорость движения) в любой момент времени.

Механика включает в себя несколько разделов, в частности **кинематику** — раздел механики, изучающий движение тел и при этом не рассматривающий причины, которыми это движение вызвано.

Механическое движение — изменение со временем положения тела (или частей тела) в пространстве относительно других тел.

Механическое движение — это движение макрообъектов. Тепловое движение молекул (атомов, ионов) внутри тела не является механическим.

Механическое движение условно разделяют на два типа: поступательное и вращательное.

Поступательное движение — это такое движение тела, при котором все точки тела движутся одинаково (рис. 3, *а*; рис. 4). Поступательно движутся ступени метро, курсор на мониторе компьютера, поезд на прямолинейном участке пути.

Вращательное движение — это такое движение тела, когда все точки тела движутся по окружностям, центры которых расположены на одной прямой линии — на оси вращения (рис. 3, *б*). Суточное вращение Земли, вращение юлы, вращение Земли вокруг Солнца — все это примеры вращательного движение.

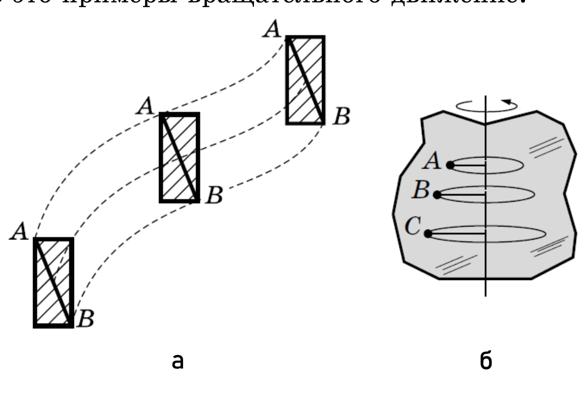


Рис. 3

Пути упрощения основной задачи механики:

1) рассматривать тело как материальную точку;
2) рассматривать поступательное движение тела.

Материальной точкой называют тело, размерами которого можно пренебречь в условиях данной задачи. *Материальная точка является физической моделью*.

1. Масса материальной точки равна массе соответствующего тела.
2. Тело не всегда можно считать материальной точкой. Например, если рассматривать падение мяча относительно мальчика, мяч можно считать материальной точкой, а при изучении деформации мяча при ударе о землю — нет (рис. 4).

Чтобы определить положение тела, то есть найти его координаты, надо задать *систему координат*, которую связать с *телом отсчета*, и выбрать *прибор для измерения времени*.

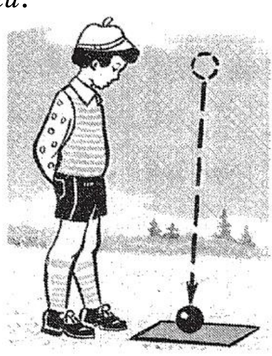


Рис. 4

Тело отсчета — условное неподвижное тело, относительно которого изучают движение всех тел, рассматриваемых в данной задаче.

Система отсчета — это тело отсчета, связанная с ним система координат, которую задают с помощью одной, двух или трех координатных осей (соответственно одномерную, двухмерную или трехмерную систему координат), и прибор для отсчета времени (часы, секундомер и т. п.) (рис. 5[1]).

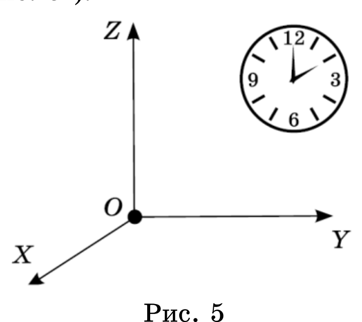


Рис. 5

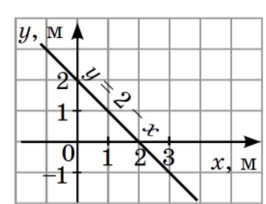
Движение тела (материальной точки) в выбранной системе отсчета задается уравнениями зависимости координат тела от времени: $x = x(t)$, $y = y(t)$, $z = z(t)$.

Траектория движения материальной точки — воображаемая линия, вдоль которой движется тело.

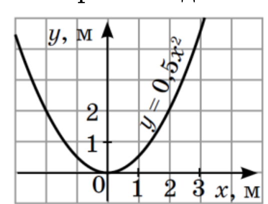
Траектория бывает прямолинейной и криволинейной.

Если тело движется в плоскости XOY, то уравнение зависимости $y(x)$ — это уравнение траектории движения тела, а график зависимости $y(x)$ — это график траектории (рис. 6).

Траектория движения тела зависит от того, относительно какого тела отсчета рассматривают движение.



Траектория — прямая



Траектория — парабола

Рис. 6

[1] Здесь и далее O — точка с координатами (0; 0).

§6 ПУТЬ И ПЕРЕМЕЩЕНИЕ

Путь l — скалярная физическая величина, равная длине участка траектории (рис. 7).

Единица пути в СИ — **метр** (м).

Путь, пройденный материальной точкой, будет разным относительно разных систем отсчета.

Перемещение $\vec{s}$ — вектор, соединяющий начальное и конечное положение материальной точки в пространстве (см. рис. 7).

Единица перемещения в СИ — **метр** (м).

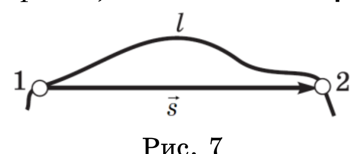


Рис. 7

Длина этого вектора — это модуль перемещения s, а его проекции на оси и координат — проекции перемещения s_x и s_y (рис. 8).

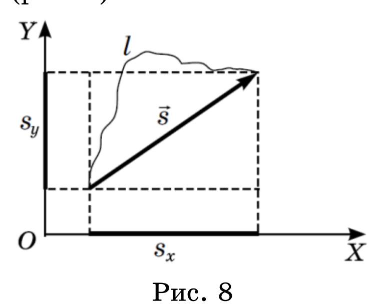
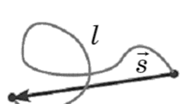


Рис. 8

В общем случае перемещение не совпадает с траекторией движения тела (рис. 9, *а*, *б*), поэтому путь, пройденный материальной точкой, обычно больше модуля перемещения. Путь и модуль перемещения равны только в том случае, когда тело движется вдоль прямой в неизменном направлении (рис. 9, *в*).



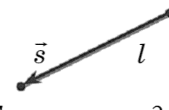
Траектория движения — кривая линия ($l > s$)

а

$s = 0$ l

Траектория движения — замкнутая линия ($l \neq 0$, $s = 0$)

б



Траектория движения — прямая линия ($l = s$)

в

Рис. 9

Для любого движения координаты тела можно найти по формулам:

$$x = x_0 + s_x,\ y = y_0 + s_y$$

Если материальная точка движется в плоскости XOY, то перемещение определяется по теореме Пифагора:

$$s = \sqrt{s_x^2 + s_y^2}$$

§7 РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Равномерное движение — это механическое движение, при котором материальная точка за любые равные интервалы времени проходит одинаковый путь.

Равномерное прямолинейное движение — это механическое движение, при котором за любые равные интервалы времени тело совершает одинаковые перемещения.

Из определения равномерного прямолинейного движения следует:

- для описания данного движения достаточно воспользоваться одномерной системой координат, поскольку траектория движения — прямая;
- отношение перемещения $\vec{s}$ к интервалу времени t, за который это перемещение произошло, для данного движения является неизменной величиной, ведь за равные интервалы времени тело совершает одинаковые перемещения.

Скорость равномерного прямолинейного движения $\vec{v}$ — это векторная физическая величина, равная отношению перемещения $\vec{s}$, пройденного материальной точкой, к интервалу времени t, в течение которого это перемещение произошло:

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}$$

Направление вектора скорости движения совпадает с направлением перемещения тела, а модуль и проекцию скорости определяют по формулам:

$$v = \frac{s}{t}\ ;\quad v_x = \frac{s_x}{t}$$

Единица скорости движения в СИ — **метр в секунду** (м/с).

Спидометр — прибор для измерения скорости.

Если тело движется вдоль оси OX, то $v_x = v$, если против, то $v_x = -v$.

График проекции скорости — отрезок прямой, параллельный оси времени (рис. 10, *а*). Чем больше скорость движения тела, тем больше расстояние от графика к оси времени.

Проекция перемещения при равномерном прямолинейном движении:

$$s_x = v_x t = x - x_0$$

График проекции перемещения — отрезок прямой (рис. 10, *б*). Чем больше скорость движения тела, тем больше угол между графиком и осью времени.

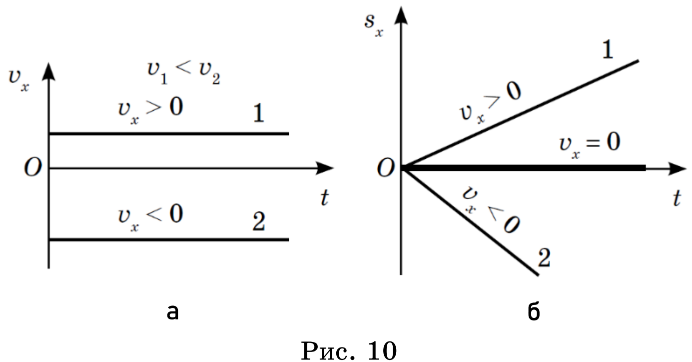


Рис. 10

Уравнение координаты (уравнение движения тела):

$$x = x_0 + v_x t,$$

где x_0 — координата тела в момент начала отсчета времени (начальная координата).

График координаты — отрезок прямой (рис. 11, *а*), t_0 — момент времени, когда тело проходит через начало координат.

Путь, который преодолевает тело при равномерном прямолинейном движении, равен модулю перемещения:

$$l = s = vt$$

График пути — отрезок прямой, который выше оси времени (рис. 11, *б*). Чем больше скорость движения тела, тем больше угол наклона графика к оси времени.

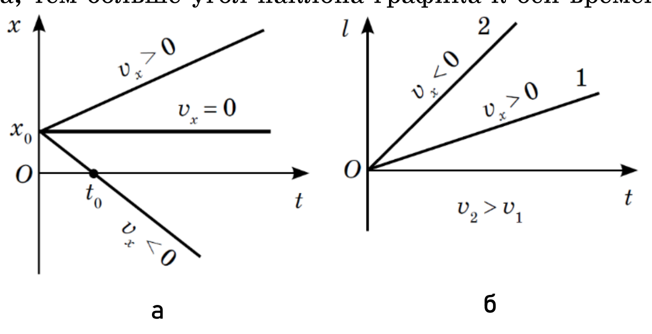
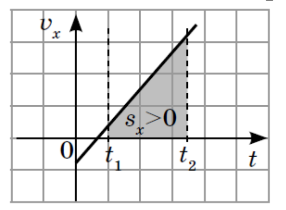


Рис. 11

Геометрический смысл перемещения: независимо от характера движения, проекция перемещения движения тела в течение интервала времени от t_1 до t_2 численно равна площади фигуры, ограниченной графиком зависимости проекции скорости движения тела, осью времени и прямыми $t = t_1$ и $t = t_2$ (рис. 12).



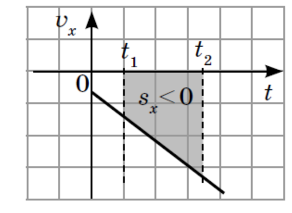


Рис. 12

§8 ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

Относительность движения — это зависимость траектории, пути, перемещения и скорости движения тела от выбора системы отсчета.

В классической механике (где скорость движения тела намного меньше скорости распространения света) промежуток времени между двумя данными событиями во всех системах отсчета имеет то же самое значение.

Закон сложения перемещений: перемещение $\vec{s}$ тела в неподвижной системе отсчета равно геометрической сумме перемещения $\vec{s}_1$ тела в подвижной системе отсчета и перемещения $\vec{s}_2$ подвижной системы отсчета относительно неподвижной (рис. 13, *а*):

$$\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2$$

Закон сложения скоростей: скорость $\vec{v}$ движения тела в неподвижной системе отсчета равна геометрической сумме скорости $\vec{v}_1$ движения тела в подвижной системе отсчета и скорости $\vec{v}_2$ движения подвижной системы отсчета относительно неподвижной (рис. 13, *б*):

$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$$

а б

Рис. 13

§9 НЕРАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Неравномерное движение — это движение, при котором тело за равные интервалы времени проходит разный путь.

При неравномерном движении значение скорости движения тела со временем изменяется.

ВИДЫ МЕХАНИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ			
По форме траектории		По характеру движения тела	
прямолинейное	криволинейное	равномерное	неравномерное
Траектория движения — прямая линия	Траектория движения — кривая линия	Значение скорости движения тела не изменяется со временем	Значение скорости движения тела изменяется со временем

Для характеристики неравномерного движения существуют понятия *средней скорости (векторной и путевой)* и *мгновенной скорости*.

Средняя векторная скорость $\vec{v}_{\text{ср}\,s}$ — это векторная физическая величина, которая характеризует неравномерное движение и равна отношению перемещения $\vec{s}$ к интервалу времени t, за который это перемещение совершено:

$$\vec{v}_{\text{ср}\,s} = \frac{\vec{s}}{t} = \frac{\vec{s}_1 + \vec{s}_2 + ... + \vec{s}_n}{t_1 + t_2 + ... + t_n}$$

Направление средней векторной скорости совпадает с направлением перемещения: $\vec{v}_{\text{ср}\,s} \uparrow\uparrow \vec{s}$.

Средняя путевая скорость $v_{\text{ср}\,l}$ — это скалярная физическая величина, равная отношению всего пути l к промежутку времени t, за который этот путь пройден:

$$v_{\text{ср}\,l} = \frac{l}{t} = \frac{l_1 + l_2 + ... + l_n}{t_1 + t_2 + ... + t_n}$$

Мгновенная скорость $\vec{v}$ — скорость движения тела в данный момент времени, скорость движения в данной точке; векторная физическая величина, которая равна средней векторной скорости, измеренной за бесконечно малый промежуток времени:

$$\vec{v} = \frac{\Delta\vec{s}}{\Delta t}$$

Здесь $\Delta\vec{s}$ — перемещение за очень малый интервал времени Δt ($\Delta t \to 0$).

Спидометр измеряет именно мгновенную скорость движения тела.

Направление мгновенной скорости совпадает с направлением перемещения в данный момент времени: $\vec{v} \uparrow\uparrow \Delta\vec{s}$.

Проекция мгновенной скорости на ось OX равна производной от координаты или проекции перемещения тела от времени:

$$v_x = x'(t) = s'(t)$$

§10 РАВНОУСКОРЕННОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Ускорение — это векторная физическая величина, характеризующая скорость изменения скорости движения тела и равна отношению изменения скорости тела к промежутку времени, за который это изменение произошло:

$$\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t},$$

где $\vec{v}_0$ — начальная скорость движения тела (скорость движения тела в момент начала отсчета времени); $\vec{v}$ — скорость движения тела через некоторый промежуток времени Δt; $\Delta\vec{v} = \vec{v} - \vec{v}_0$ — изменение скорости движения тела; $\vec{a}$ — ускорение движения тела.

Данную формулу можно записать и *в проекциях на ось координат OX*:

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{\Delta t}$$

Единица ускорения в СИ — **метр в секунду в квадрате (метр в секунду за секунду)** (м/с^2).

Если уменьшать интервал времени, за который изменяется скорость, то чем меньше будет этот интервал $\Delta t \to 0$, тем меньшим будет изменение скорости $\Delta\vec{v} \to 0$, а дробь $\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$ стремиться к некоторому граничному значению. Эту границу называют **мгновенным ускорением** в некоторый момент времени. В общем случае (для любого движения):

$$a_x = v_x'(t)$$

Если ускорение равно нулю ($\vec{a} = 0$), скорость движения тела не изменяется ни за значением, ни за направлением ($\vec{v} = \vec{v}_0$), то есть тело *движется равномерно прямолинейно* или вовсе *не движется* ($\vec{v}_0 = \vec{v} = 0$) — это отдельный случай равноускоренного прямолинейного движения.

Акселерометр — прибор для измерения ускорения.

Равноускоренное прямолинейное движение — это такое механическое движение, при котором скорость движения тела за любые равные интервалы времени изменяется одинаково; движение с постоянным ускорением:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \text{const}$$

В уравнении $a_x = a$ (рис. 14, *а*), если тело ускоряется; $a_x = -a$ (рис. 14, *б*), если тело замедляется.

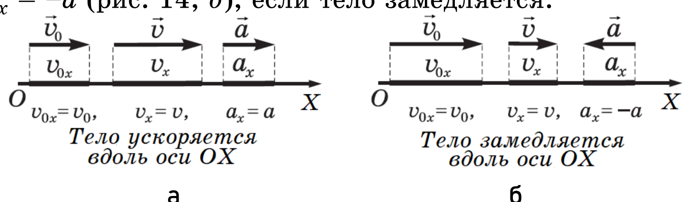


Рис. 14

График проекции ускорения — отрезок прямой, параллельный оси времени (рис. 15, *а*). Чем больше модуль ускорения тела, тем больше расстояние от графика к оси времени.

Проекция конечной мгновенной скорости на ось *OX* при равноускоренном прямолинейном движении:

$$v_x = v_{0x} + a_x t$$

График проекции скорости — отрезок прямой (рис. 15, *б*). Чем больше модуль ускорения движения тела, тем больше угол между графиком и осью времени; t_0 — момент времени, когда направление движения тела меняется на противоположный (точка поворота), в этот момент скорость движения тела равна нулю.

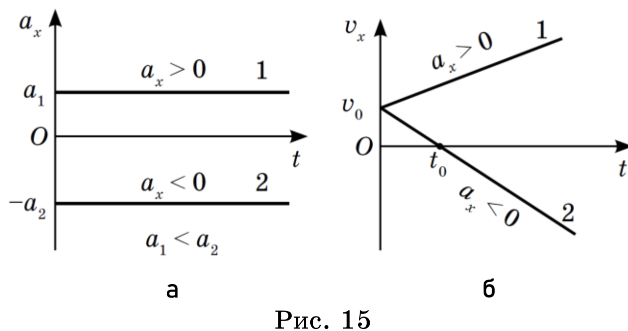


Рис. 15

Проекция перемещения при равноускоренном прямолинейном движении имеет вид:

$$s_x = \frac{v_x + v_{0x}}{2}t \qquad s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2} \qquad s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}$$

График проекции перемещения — парабола (рис. 16, *а*). Если $a_x > 0$, ветки параболы направлены вверх, если $a_x < 0$ — вниз. Вершина параболы соответствует моменту времени, когда тело совершает поворот, и координате, где тело совершает поворот.

Уравнение движения при равноускоренном прямолинейном движении имеет вид:

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$$

График координаты — парабола (рис. 16, *б*).

Во время встречи тела имеют одинаковую координату: $x_1 = x_2$.

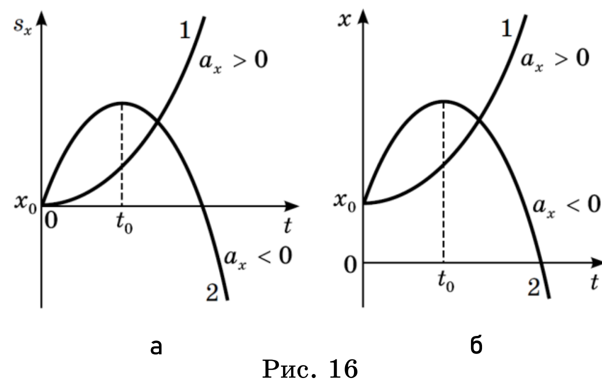


Рис. 16

Геометрический смысл пути: путь, который прошло тело в течение интервала времени от t_1 до t_2 численно равен общей площади фигуры, ограниченной графиком зависимости проекции скорости движения тела от времени, осью времени и прямыми $t = t_1$ и $t = t_2$ (рис. 17).

Если направление движения тела не меняется, то путь равен модулю перемещения; если меняется, — то сумме модулей перемещения тела до поворота и после поворота.

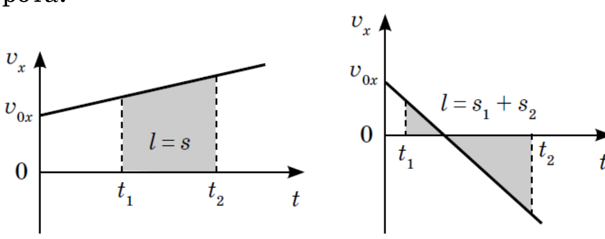


Рис. 17

§11 РАВНОУСКОРЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ ПО ВЕРТИКАЛИ

Свободное падение — это движение тела только под действием силы тяжести; падение тела в безвоздушном пространстве.

Во время свободного падения все тела падают на Землю с одинаковым ускорением (для данной широты), которое называют **ускорением свободного падения** ($\vec{g}$).

1. Вектор ускорения свободного падения всегда направлен вертикально вниз.
2. Ускорение свободного падения впервые измерил нидерландский математик, астроном и физик *Христиан Гюйгенс* в 1656 г. Вблизи поверхности Земли, то есть на небольшом (по сравнению с радиусом Земли) расстоянии, оно приблизительно равно 9,81 м/с^2.
3. Ускорение свободного падения не зависит от массы тела (доказал *Г. Галилей*).
4. С увеличением высоты ускорение свободного падения уменьшается.

Движение тела, кинутого вертикально вверх или вниз, — это равноускоренное прямолинейное движение с ускорением, которое равно ускорению свободного падения: $\vec{a} = \vec{g}$.

Проекция скорости на вертикальную ось OY определяется по формуле:

$$v_y = v_{0y} + g_y t$$

Если тело движется вертикально вверх, то модуль скорости уменьшается, если вертикально вниз — увеличивается.

Если тело бросить вертикально вверх, то во время полета и падения модуль скорости его движения является одинаковым на той же высоте.

Уравнение проекции перемещения (высота подъема или падения тела) на вертикальную ось OY определяется по формулам:

$$h_y = \frac{v_y + v_{0y}}{2} t \qquad h_y = v_{0y} t + \frac{g_y t^2}{2} \qquad h_y = \frac{v_y^2 - v_{0y}^2}{2g_y}$$

Уравнение координаты (уравнение движения тела) на вертикальную ось OY определяется по формуле:

$$y = y_0 + v_{0y} t + \frac{g_y t^2}{2}$$

Если тело свободно падает без начальной скорости, перемещения тела за равные последовательные интервалы времени относятся как нечетные числа:

$$s_1 : s_2 : s_3 \ldots = 1 : 3 : 5 \ldots .$$

§12 КРИВОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Криволинейное движение — это такое движение тела, при котором траектория движения тела представляет собой кривую линию.

В случае криволинейного движения мгновенная скорость движения направлена по касательной к траектории движения тела в рассматриваемой точке (рис. 18).

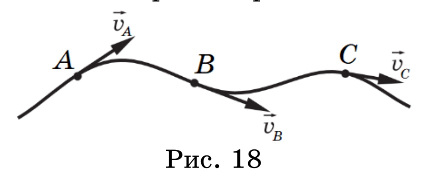


Рис. 18

Поскольку при криволинейном движении направление мгновенной скорости постоянно изменяется, *криволинейное движение — это всегда движение с ускорением*.

Линейная скорость v — это скалярная физическая величина, которая характеризует криволинейное движение и равная средней путевой скорости, измеренной за бесконечно малый промежуток времени:

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t}, \text{ если } \Delta t \to 0$$

Поскольку для очень малых интервалов времени модуль перемещения (Δs) приближается к длине участка траектории (Δl), *линейная скорость в данной точке равна модулю мгновенной скорости*.

В случае *равномерного криволинейного движения* за любые равные промежутки времени тело проходит одинаковый путь, поэтому линейную скорость движения тела можно определить по формуле:

$$v = \frac{l}{t},$$

где l — путь, пройденный телом; t — время движения тела.

Если сопротивление воздуха пренебрежимо мало, то **тело, брошенное горизонтально** или **под углом к горизонту**, будет двигаться по *параболической траектории* только под действием силы тяжести с ускорением $\vec{g}$. Такое движение удобно рассматривать как результат сложения двух независимых движений:

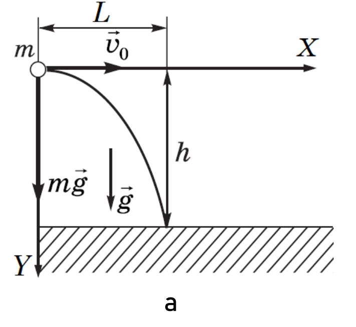
1) *горизонтального* — равномерного вдоль оси OX (поскольку $g_x = 0$), которое описывается уравнениями:
$$v_x = v_{0x}; \; x = x_0 + v_{0x} t;$$
2) *вертикального* — равноускоренного (с ускорением $\vec{g}$) вдоль оси OY, которое описывается уравнениями:
$$v_y = v_{0y} + g_y t; \; y = y_0 + v_{0y} t + \frac{g_y t^2}{2}.$$

Модуль и направление скорости движения тела в произвольной точке траектории (рис. 18) находим, воспользовавшись теоремой Пифагора и определением тангенса:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}; \; \operatorname{tg} \alpha = \frac{v_y}{v_x}$$

Тело, брошенное горизонтально (рис. 19)

1) *Дальность полета тела:*
$$L = v_0 t$$
2) *Высота падения тела:*
$$h = \frac{gt^2}{2}$$
3) *Модуль скорости тела, брошенного горизонтально:*
$$v = \sqrt{v_0^2 + (gt)^2}$$



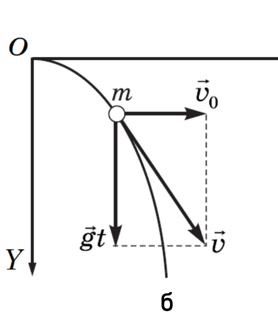


Рис. 19

Тело, брошенное под углом α к горизонту (рис. 20)

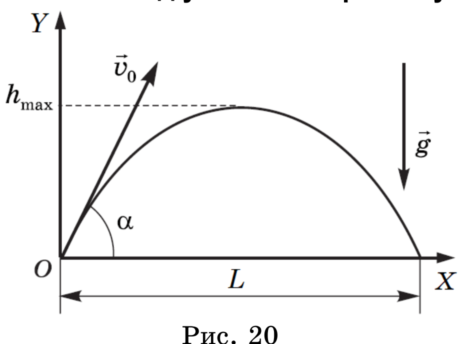


Рис. 20

1) Проекции начальной скорости на оси OX и OY:
$v_{0x} = v_0 \cos\alpha$; $v_{0y} = v_0 \sin\alpha$.
2) *Дальность полета тела*:

$$L = v_0 \cos\alpha\, t = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$$

3) *Максимальная высота подъема тела* ($0 < \alpha < \pi$):

$$h_{max} = v_0 \sin\alpha\, t_п - \frac{gt_п^2}{2} = \frac{v_0^2 \sin^2\alpha}{2g}$$

4) *Время движения тела* ($t_п$ — время подъема/падения):

$$t = 2t_п = \frac{2v_0 \sin\alpha}{g}$$

§13 РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ

Равномерное движение тела по окружности — это такое криволинейное движение, при котором траекторией движения тела является окружность, а линейная скорость не изменяется со временем.

Равномерное движение по окружности — это периодическое движение, поскольку оно повторяется через одинаковые промежутки времени.

Период вращения T — физическая величина, равная интервалу времени, за который тело равномерно движется по окружности и осуществляет один полный оборот:

$$T = \frac{t}{N},$$

где N — число оборотов за интервал времени t.

Единица периода вращения в СИ — **секунда** (с).

Частота вращения n — физическая величина, численно равная количеству оборотов за единицу времени:

$$n = \frac{N}{t}$$

Единица частоты вращения в СИ — **оборот в секунду** (об/с, или c^{-1}).

Период и частота вращения — *взаимно обратные величины*:

$$T = \frac{1}{n};\ n = \frac{1}{T}$$

За время, равное одному периоду ($t = T$), тело проходит путь, равный длине окружности ($l = 2\pi R$, где R — радиус окружности), поэтому **линейную скорость** можно вычислить по формулам:

$$v = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi R n$$

Угловая скорость ω — это физическая величина, численно равная углу поворота радиуса за единицу времени (рис. 21, *а*)*:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$$

Угол поворота $\Delta\varphi$ — это угол, на который за время Δt поворачивается радиус, проведенный к положению тела в данный момент. *Угол поворота в СИ* измеряют в радианах (рад). $180° = \pi$ (рад).

За время, равное одному периоду ($t = T$), радиус совершает один оборот ($\varphi = 2\pi$), поэтому *угловую скорость* можно вычислить по формуле:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Единица угловой скорости в СИ — **радиан в секунду** (рад/с, или c^{-1}).

Угловая и линейная скорости связаны соотношением:

$$v = \omega R$$

Центростремительное ускорение $\vec{a}_{цс}$ — ускорение, характеризующее быстроту изменения направления линейной скорости при движении материальной точки по окружности.

При равномерном движении по окружности ускорение движения тела в данной точке всегда направлено к центру окружности (является перпендикулярным мгновенной скорости) (рис. 21, *б*)**.

Центростремительное ускорение рассчитывается по формулам:

$$a_{цс} = \omega v = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R$$

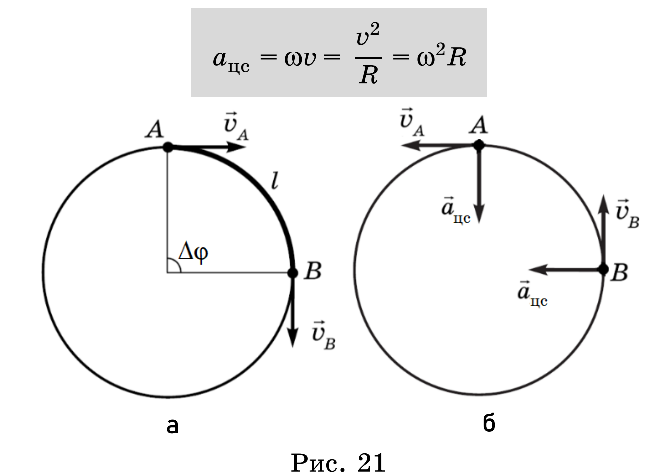


Рис. 21

* Угловая скорость ω определяет направление и быстроту вращения. Если $\omega = \text{const}$, то вращение называется *равномерным*. Для характеристики *неравномерного вращения* тела вводится понятие ***углового ускорения***. Угловое ускорение определяется отношением изменения угловой скорости за промежуток времени продолжительности этого промежутка: $\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\omega - \omega_0}{\Delta t}$, $[\varepsilon] = \frac{рад}{c^2}$.

** При движении тела по окружности возникает еще *тангенциальное (касательное) ускорение* a_τ — составляющую ускорения, определяющая изменение скорости по величине.

ОСНОВЫ ДИНАМИКИ

§14 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ДИНАМИКИ

Динамика — это раздел механики, в основе которого лежит количественное описание взаимодействия тел, определяющего характер их движения (под влиянием других тел).

Основная задача динамики — изучить возможные взаимодействия тел, выяснить законы, которым подчиняются движение и взаимодействие тел, и на основе этих законов уметь определять положение тел в любой момент времени.

Явление инерции — явление сохранения телом состояния покоя или равномерного прямолинейного движения при условии, что на него не действуют другие тела и поля или их действия скомпенсированы.

Закон инерции Г. Галилея[2]: тело движется равномерно прямолинейно или находится в состоянии покоя лишь тогда, когда на него не действуют другие тела или действия других тел скомпенсированы.

Инерциальные системы отсчета — это такие системы отсчета (далее СО), относительно которых тело сохраняет скорость своего движения постоянной, если на него не действуют другие тела и поля или если их действия скомпенсированы; системы отсчета, относительно которых наблюдается явление инерции.

Неинерциальные системы отсчета — системы отсчета, относительно которых *не* наблюдается явление инерции. Любая СО, движущаяся относительно поверхности Земли с ускорением, является *неинерциальной*.

Обычно для расчета движения вблизи земной поверхности за инерциальную СО выбирают СО, связанную с Землей.

Если инерциальные СО движутся друг относительно друга со скоростью, намного меньшей скорости распространения света, то при переходе из одной инерциальной СО в другую ускорение движения тела, масса тела и время не изменяются.

Принцип относительности в классической механике (принцип относительности Г. Галилея): все инерциальные СО являются равноправными, то есть во всех этих системах любые механические явления протекают одинаково.

Инертность — свойство тела, которое заключается в том, что для изменения скорости движения тела требуется некоторое время.

Вследствие взаимодействия более инертное тело приобретает меньшее ускорение, чем менее инертное.

§15 СИЛА И МАССА

Взаимодействие — это действие тел или частиц друг на друга.

Виды взаимодействий: гравитационное, электромагнитное, сильное, слабое.

Количественной мерой взаимодействия является *сила*.

Сила — физическая величина, характеризующая взаимодействие тел.

Сила в механике $\vec{F}$ — это векторная физическая величина, являющаяся мерой взаимодействия тел, в результате которого тела получают ускорение или (и) деформируются.

Единица силы в СИ — **ньютон** (Н).

1 Н равен силе, которая, действуя на тело массой 1 кг, сообщает ему ускорение 1 м/с^2:

$$1\ \text{Н} = 1\ \text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Чтобы полностью определить силу, следует указать:

- ее значение (или записать формулу, по которой она определяется);
- ее направление;
- отметить точку, к которой эта сила приложена.

Равнодействующая сила $\vec{F}$ — это сила, которая производит на тело такое же действие, как несколько одновременно действующих сил, и равна геометрической сумме сил, действующих на данное тело:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$$

Равнодействующую сил определяют по правилу сложения векторов (рис. 22).

Динамометр — прибор для измерения силы (рис. 23).

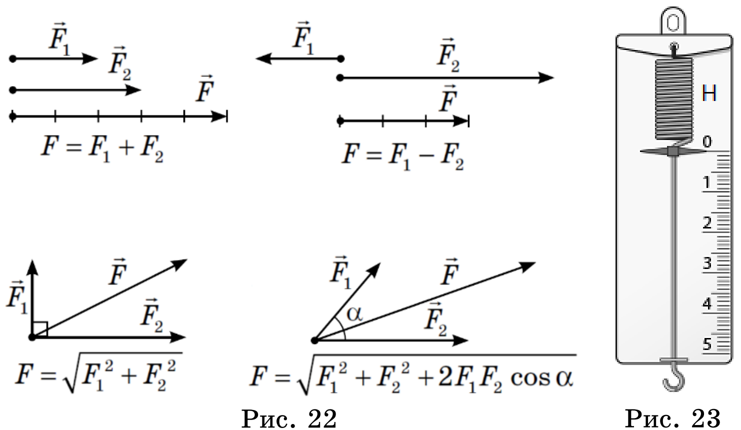


Рис. 22 Рис. 23

Масса m — это скалярная физическая величина, являющаяся мерой инертности, мерой гравитации тела и мерой энергии.

Единица массы в СИ — **килограмм** (кг).

1 кг равен массе международного эталона килограмма (рис. 24).

Измерить массу тела означает сравнить ее с массой тела, масса которого принята за единицу.

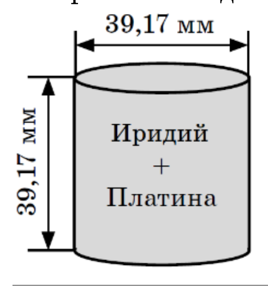


Рис. 24

Основные свойства массы

1. *Масса тела — величина инвариантная*: она не зависит от выбора СО.
2. Масса тела не зависит от скорости движения тела (следствие инвариантности).
3. *Масса тела — величина аддитивная*: масса тела равна сумме масс всех частиц, из которых состоит

---
[2] Сейчас закон, установленный Г. Галилеем, называют первым законом Ньютона.

тело, а масса системы тел равна сумме масс тел, образующих систему.

4. *В классической механике выполняется закон сохранения массы*: при любых процессах, происходящих в системе тел, общая масса системы остается неизменной; масса тела не изменяется при его взаимодействии с другими телами.

Способы измерения массы

1. Взвешиванием, где сравнивается взаимодействие тела и грузиков с Землей: чем больше масса тела, тем сильнее оно притягивается к Земле.
2. При любом взаимодействии двух тел отношение их масс обратно пропорционально отношению модулей ускорений и скоростей, полученных телами в результате этого взаимодействия[3]:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1} \quad \text{или} \quad \frac{m_1}{m_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

3. С известной плотностью ρ и объемом V тела:

$$m = \rho V$$

4. Через массу m_0 молекулы и количество N молекул в теле (§41):

$$m = m_0 N$$

Центр масс тела — это точка пересечения прямых, вдоль которых направлены силы, каждая из которых вызывает только поступательное движение тела (рис. 25).

Если размеры тела гораздо меньше радиуса Земли, то *центр масс тела совпадает с центром тяжести*. Центр тяжести симметричных фигур расположен в их геометрическом центре.

Центр массы системы движется как материальная точка, в которой сосредоточена масса всей системы и на которую действует сила, равная геометрической сумме всех внешних сил, действующих на тело.

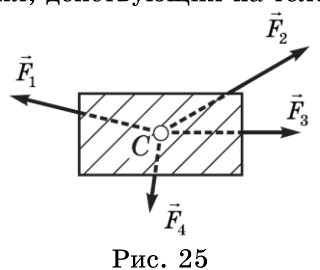


Рис. 25

§16 ЗАКОНЫ НЬЮТОНА

Первый закон механики Ньютона — закон инерции: существуют такие системы отсчета, относительно которых тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, если на него не действуют другие тела и поля или если их действия скомпенсированы ($\vec{v} = \overrightarrow{\text{const}}$ при условии $F = 0$).

Первый закон Ньютона постулирует существование инерциальных СО.

Все законы Ньютона выполняются только в инерциальных СО.

Второй закон механики Ньютона: ускорение a, приобретаемое телом в результате действия силы F, прямо пропорционально данной силе и обратно пропорционально массе m тела:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$$

Следствия из второго закона Ньютона

1. Ускорение определяется силой, действующей на тело (сила — причина ускорения). Изменение силы приводит к изменению ускорения.
2. Если на тело одновременно действуют несколько сил, то второй закон Ньютона имеет вид (основное уравнение динамики):

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \ldots + \vec{F}_n}{m}, \text{ или } \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \ldots + \vec{F}_n = m\vec{a}.$$

3. Направление ускорения движения тела всегда совпадает с направлением равнодействующей сил, приложенных к телу: $\vec{a} \uparrow\uparrow \vec{F}$;
4. Если равнодействующая сил, приложенных к телу, равна нулю, то тело движется равномерно прямолинейно:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \ldots + \vec{F}_n = 0.$$

5. Если равнодействующая сил, приложенных к телу, не меняется со временем и направлена вдоль линии движения тела, то тело движется равноускорено прямолинейно:
   — тело ускоряет движение, если направление равнодействующей совпадает с направлением движения тела;
   — тело замедляет движение, если направление равнодействующей противоположно направлению движения тела.
6. Если равнодействующая сил, приложенных к телу, перпендикулярна направлению движения тела, то тело равномерно движется по окружности:

$$\vec{F} = m\vec{a}_{\text{цс}}.$$

Третий закон механики Ньютона: силы, с которыми тела действуют друг на друга, направлены вдоль одной прямой, равны по модулю и противоположны по направлению:

$$\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1},$$

где $\vec{F}_{1,2}$ — сила, с которой второе тело действует на первое (эта сила приложена к первому телу); $\vec{F}_{2,1}$ — сила, с которой первое тело действует на второе (эта сила приложена ко второму телу).

1. Третий закон Ньютона выполняется как в случаях непосредственного контакта тел, так в случаях взаимного взаимодействия тел на расстоянии.
2. Силы взаимодействия тел возникают парами и имеют одинаковую природу:

$$\vec{P} = -\vec{N} \text{ (рис. 26, } a\text{)},$$
$$\vec{F}_{\text{тр}} = -\vec{F}'_{\text{тр}} \text{ (рис. 26, } б\text{)}.$$

3. Силы взаимодействия тел приложены к разным телам и поэтому не имеют равнодействующей.

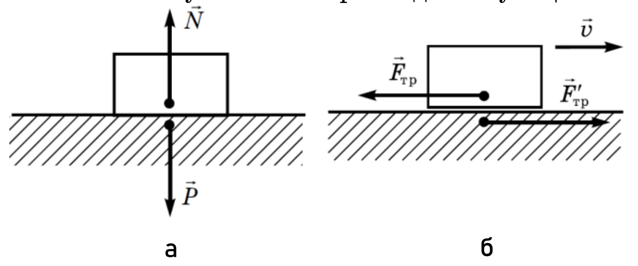


Рис. 26

---

[3] Следствие закона сохранения импульса (§22).

§17 ГРАВИТАЦИОННЫЕ СИЛЫ. СПУТНИКИ

Гравитационное взаимодействие — взаимодействие, свойственное всем тела во Вселенной и проявляющееся в их взаимном притяжении друг к другу.

Силы тяжести и всемирного притяжения являются гравитационными силами. Они являются проявлением *гравитационных полей* (полей тяжести).

Гравитационное поле характеризует изменение физических и геометрических свойств пространства вблизи массивных тел и может быть обнаружено с силовым воздействием на другие физические тела.

Сила всемирного тяготения — сила, которая обусловливает притяжение всех тел во Вселенной. Ее модуль определяется по закону всемирного тяготения, который открыл *И. Ньютон*.

Закон всемирного тяготения — закон гравитации: между любыми двумя телами действуют силы взаимного притяжения, которые прямо пропорциональны произведению масс этих тел и обратно пропорционально квадрату расстояния между ними:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где m_1 и m_2 — массы взаимодействующих тел; r — расстояние между телами; $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$ — гравитационная постоянная (коэффициент пропорциональности, одинаковый для всех тел).

Гравитационная постоянная численно равна силе, с которой две материальные точки массой 1 кг каждая взаимодействуют на расстоянии 1 м друг от друга.

Силы гравитационного притяжения действуют вдоль прямой, соединяющей центры тяжести взаимодействующих тел. Эти силы равны по модулю и противоположны по направлению (рис. 27).

Условия применения закона всемирного тяготения

1) Для материальных точек.
2) Для тел, имеющих шарообразную форму и сферическое распределение вещества.
3) Если одно из тел — шар, размеры и масса которого значительно больше, чем размеры и масса другого тела, находящегося на поверхности этого шара или на расстоянии от него.

Научные достижения некоторых ученых в сфере гравитации:

- *Николай Коперник* — создатель гелиоцентрической системы мира.
- *Иоганн Кеплер* — открыл законы движения небесных тел (законы Кеплера).
- *Генри Кавендиш* — определил гравитационную постоянную, массу и среднюю плотность Земли.

Сила тяжести $\vec{F}_т$ — сила, с которой Земля (или другое астрономическое тело) притягивает к себе тела, находящиеся на ее поверхности или вблизи нее[4]:

$$F_т = G\frac{mM_З}{r^2}, \text{ или } F_т = G\frac{mM_З}{(R+h)^2},$$

где G — гравитационная постоянная; m — масса тела; $M_З$ — масса Земли; $r = R + h$ — расстояние от центра Земли до тела (рис. 28).

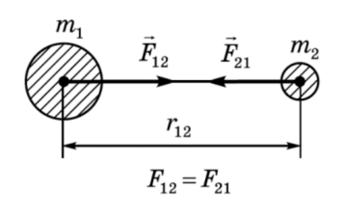


Рис. 27

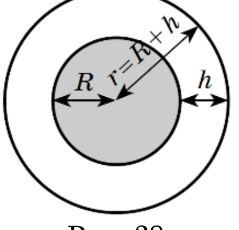


Рис. 28

Ускорение свободного падения — это ускорение, приобретаемое телом под действием силы тяжести и численно равное силе, с которой гравитационное поле Земли действует на тело массой 1 кг:

$$g = G\frac{M_З}{(R+h)^2}$$

Как и сила тяжести, ускорение свободного падения всегда направлено вертикально вниз ($\vec{g} \uparrow\uparrow \vec{F}_т$) независимо от того, в каком направлении движется тело:

$$F_т = mg.$$

Из-за вращения Земли, а также из-за того, что форма Земли — геоид (экваториальный радиус Земли больше полярного на 21 км), ускорение свободного падения зависит от географической широты местности (рис. 28).

Искусственный спутник — это тело, которое движется вокруг какого-либо небесного тела только под действием силы тяжести.

Орбитальная скорость — это скорость, которую имеет искусственный спутник Земли на высоте над поверхностью Земли.

Орбитальная скорость направлена по касательной к данной точке траектории, то есть перпендикулярно к радиусу орбиты (рис. 30).

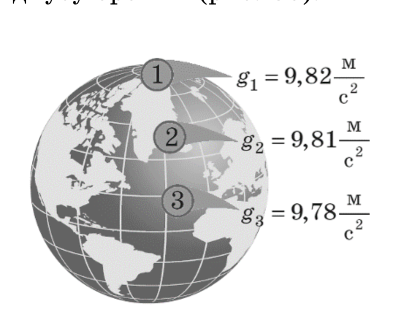


Рис. 29

Рис. 30

Если искусственный спутник Земли движется по круговой орбите со скоростью v, то сила тяжести предоставляет ему центростремительного ускорения:

$$a_{цс} = \frac{v^2}{r} = \frac{v^2}{R+h}$$

Соответственно со вторым законом Ньютона $F = ma$, то есть $G\frac{mM}{(R+h)^2} = \frac{mv^2}{R+h}$, следует, что модуль орбитальной скорости рассчитывается по формуле:

$$v = \sqrt{G\frac{M}{R+h}} = \sqrt{g(R+h)}$$

Первая космическая скорость v_I — скорость, которую надо сообщить телу в момент запуска с данной планеты ($h = 0$), чтобы тело стало ее искусственным спутником и при этом двигалось бы по окружности, центр которой совпадает с центром данной планеты.

Из формулы $v_I = \sqrt{G\frac{M_З}{R_З}} = \sqrt{gR_З} \approx 7{,}9$ км/с.

---

[4] Сила тяжести обусловлена не только гравитационным притяжением Земли, а и ее суточным вращением.

§18 СИЛА УПРУГОСТИ

Деформация — изменение формы и (или) размеров тела вследствие воздействия на тело силы (сил).

Виды деформаций по характеру смещений: растяжение, сжатие, изгиб, кручение, сдвиг.

Если расстояние между одними молекулярными слоями увеличивается, а между другими уменьшается, то это *деформация изгиба*.

Если одни молекулярные слои сдвигаются относительно других, то это *деформация сдвига*.

Если молекулярные слои поворачиваются относительно друг друга, то это *деформация кручения*.

Причина деформации: под действием сил разные части (частицы) тела движутся по-разному и в результате смещаются относительно друг друга.

ВИДЫ ДЕФОРМАЦИЙ ПО ТИПУ	
Упругие (обратимые)	**Пластические**
Деформации, которые полностью исчезают после прекращения действия на тело внешних сил. При этом тело принимает первоначальные размеры и форму	Деформации, которые сохраняются (или частично) после прекращения действия на тело внешних сил, а тела не восстанавливают свои первоначальные форму и объем

Удлинение Δl — это физическая величина, равная изменению длины тела при деформации растяжения или сжатия:

$$\Delta l = |l - l_0|,$$

где l — длина деформированного тела; l_0 — первоначальная длина тела.

Упругость — это способность деформированных тел восстанавливать начальные форму и объем после прекращения внешнего воздействия.

Сила упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$ — это сила, которая возникает при упругой деформации тела и направлена противоположно направлению смещения частей (частиц) этого тела в процессе деформации.

Сила упругости — проявление действия межмолекулярных сил.

Силы упругости направлены перпендикулярно к поверхности деформированного тела — например, сила нормальной реакции опоры ($\vec{N}$) (сила упругости подставки), или вдоль нити ($\vec{T}$), пружины ($\vec{F}_{\text{упр}}$) (рис. 31).

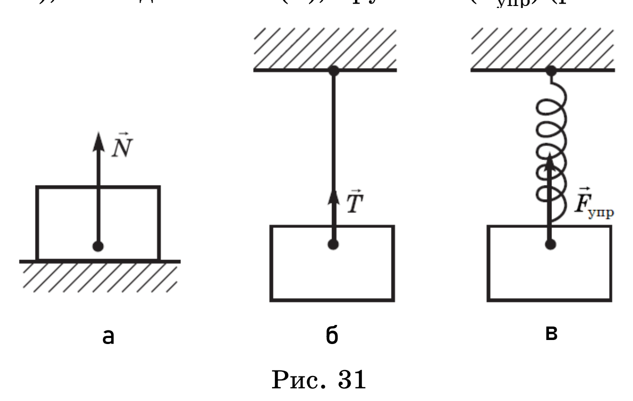


Рис. 31

Сила реакции опоры $\vec{N}$ — сила упругости, которая действует на тело со стороны опоры перпендикулярно к ее поверхности.

Сила натяжения $\vec{T}$ — это сила упругости, которая действует на тела со стороны подвеса.

При *малых* упругих деформациях растяжения и сжатия выполняется **закон Гука**: сила упругости прямо пропорциональна удлинению тела и всегда пытается вернуть тело в недеформированное состояние (рис. 32):

$$\vec{F}_{\text{упр}} = -k\vec{x},$$

где $F_{\text{упр}}$ — сила упругости; $x = \Delta l$ — удлинение тела; k — коэффициент пропорциональности, который называют *жесткостью тела*. Знак «−» показывает, что сила упругости направлена в бок, противоположный удлинению.

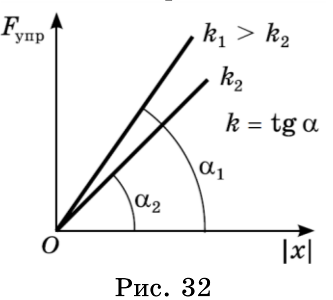


Рис. 32

Единица жесткости в СИ — **ньютон на метр** (Н/м).

Жесткость — это характеристика тела, поэтому она не зависит от силы упругости и от удлинения тела.

Жесткость *зависит от упругих свойств материала*, из которого изготовлено тело; от *формы* тела и его *размеров* (см. §35).

Соединения пружин

1. Последовательное (рис. 33, *а*):

$$k = k_1 + k_2 + \dots + k_n$$

2. Параллельное (рис. 33, *б*):

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n}$$

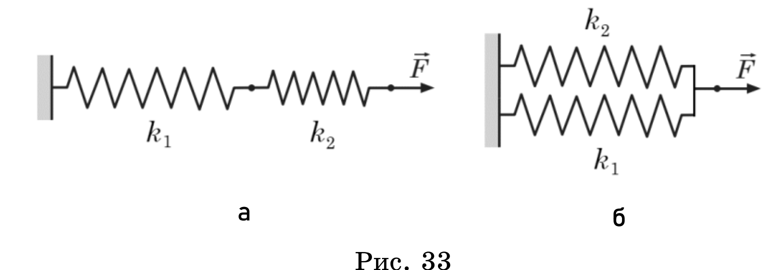


Рис. 33

§19 СИЛА ТРЕНИЯ

Сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$ — это сила, возникающая при движении или попытке движения одного тела по поверхности другого или при движении тела внутри жидкой или газообразной среды.

Сила трения всегда направлена вдоль поверхности соприкасающихся тел противоположно скорости их относительного перемещения.

Виды трения

1. *Сухое трение* (возникает в зоне контакта поверхностей твердых тел при отсутствии между ними жидкой или газообразной среды);
2. *Вязкое (жидкое) трение* (возникает при движении твердого тела в жидкой или газообразной среде; направлена против скорости движения тела).

Различают *силу трения покоя*, *силу трения скольжения*, *силу трения качения*.

Сила трения покоя $\vec{F}_{\text{тр. п}}$ — это сила трения, возникающая между соприкасающимися поверхностями двух тел и препятствующая возникновению их относительного движения.

Сила трения покоя всегда равна по модулю и противоположна по направлению равнодействующей внешних сил $\vec{F}_{\text{внеш}}$, которая пытается сдвинуть тело с места (рис. 34, *а*):

$$\vec{F}_{\text{тр. п}} = -\vec{F}_{\text{внеш}}$$

Сила трения покоя является той движущей силой, благодаря которой передвигаются люди, животные, транспорт.

Например, двигатель автомобиля вращает ведущие колеса. Трение по земле препятствует этому вращению, толкая колесо вперед (таким образом, возникает сила тяги автомобиля) (рис. 34, *б*).

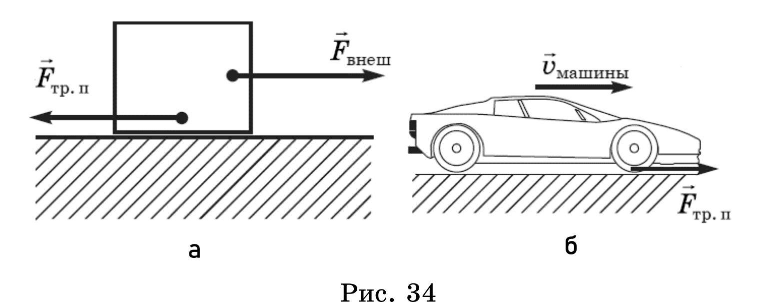


Рис. 34

Сила трения покоя в случае вязкого трения отсутствует.

С началом движения сила трения покоя переходит в силу трения скольжения.

Сила трения скольжения $\vec{F}_{\text{тр. ск}}$ — это сила, возникающая при относительном движении (скольжении) одного тела по поверхности другого.

Сила трения скольжения всегда направлена вдоль поверхности соприкосновения тел в сторону, противоположную направлению относительной скорости движения тел (рис. 35).

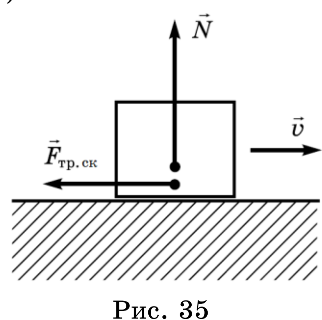


Рис. 35

Сила трения скольжения не зависит от площади соприкасающихся поверхностей.

Сила трения скольжения зависит от свойств соприкасающихся поверхностей и прямо пропорциональна *силе нормальной реакции опоры* $\vec{N}$ — **закон Амонтона—Кулона:**

$$F_{\text{тр. ск}} = \mu N$$

Здесь μ — *коэффициент трения скольжения*, который зависит от материалов и качества обработки соприкасающихся поверхностей, незначительно зависит от относительной скорости движения соприкасающихся поверхностей и является безразмерной величиной.

При качении одного тела по поверхности другого возникает **сила трения качения**, которая обычно меньше силы трения скольжения; зависит от радиуса тела, материала и твердости соприкасающихся поверхностей.

Сила трения, как и сила упругости, — проявление сил межмолекулярного взаимодействия.

§20 ВЕС ТЕЛА. НЕВЕСОМОСТЬ. ПЕРЕГРУЗКИ

Вес тела $\vec{P}$ — это сила упругости, с которой вследствие притяжения к Земле тело действует на горизонтальную опору или вертикальный подвес.

Единица веса в СИ, как и любой другой силы, — **ньютон** (Н).

Вес тела — сила упругости, поэтому *вес имеет электромагнитную природу*.

Если опора горизонтальная и находится в покое или движется равномерно прямолинейно, то вес тела по модулю и направлению совпадает с силой тяжести:

$$\vec{P} = m\vec{g},$$

Вес приложен к опоре или подвесу, а сила тяжести — к центру массы тела (рис. 36).

Если опора — наклонная плоскость, то вес тела — равнодействующая сил упругости и трения покоя, с которыми тело действует на опору (рис. 37):

$$\vec{P} = -\vec{Q} \text{ или } \vec{P} = -(\vec{N} + \vec{F}_{\text{тр. п}}),$$

где $\vec{Q}$ — сила реакции опоры; $\vec{N}$ — нормальная реакция опоры; $\vec{F}_{\text{н. д}}$ — сила нормального давления.

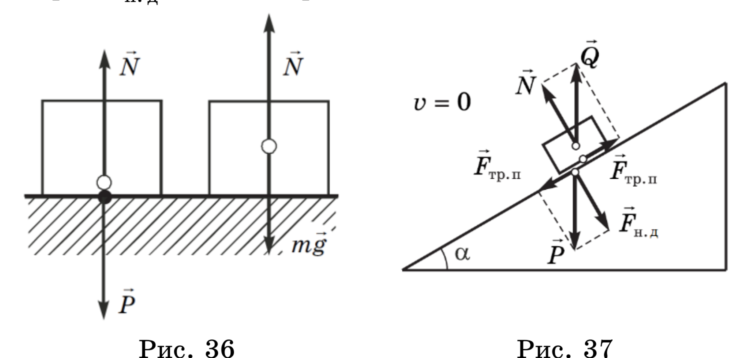


Рис. 36 Рис. 37

Вес тела, движущегося с ускорением, меняется:

1. Если ускорение тела направлено вертикально вверх, то его вес увеличивается:
$$P = m(g + a).$$
2. Если ускорение тела направлено вертикально вниз, то его вес уменьшается:
$$P = m(g - a).$$
3. Если ускорение тела равно ускорению свободного падения, то вес тела равен нулю (*состояние невесомости*):
$$a = g;\ P = 0.$$
4. Если ускорение тела направлено горизонтально, то модуль веса определяется по формуле:
$$P = m\sqrt{g^2 + a^2}.$$

Невесомость — это такое состояние тела, при котором отсутствует внутренняя напряженность, обусловленная силой тяжести.

Причина невесомости: сила тяжести придает телу и его опоре одинакового ускорения. Этот вывод справедлив для всех тел, которые движутся только под действием силы тяжести.

Коэффициент перегрузки n — физическая величина, которая характеризует увеличение веса тела и равна отношению ускорения a тела к ускорению свободного падения g:

$$n = \frac{a}{g}$$

Если $a = ng$, то возникает перегрузка в $(n + 1)$ раз, через которую вес тела увеличивается:

$$P = mg(n + 1).$$

Перегрузка показывает, во сколько раз увеличивается вес тела, движущегося с ускорением, по сравнению с весом тела, находящегося в покое на горизонтальной опоре.

§21 РАВНОВЕСИЕ ТЕЛ. МОМЕНТ СИЛЫ

Равновесие тела — это сохранение состояния движения или покоя тела с течением времени.

Тело находиться в равновесии, если скорости его поступательного и вращательного движения будут оставаться неизменными.

Плечо силы l — это наименьшее расстояние от оси вращения до линии действия силы (рис. 38).

Момент силы M — это физическая величина, которая равна произведению модуля силы F, действующей на тело, на плечо l этой силы.

$$M = Fl$$

Единица момента силы в СИ — **ньютон-метр** (Н · м).

Причина изменения скорости вращательного движения — наличие момента сил.

Если сила вращает или пытается вращать тело против хода часовой стрелки, то момент силы имеет положительное значение, а если по ходу часовой стрелки — отрицательное значение.

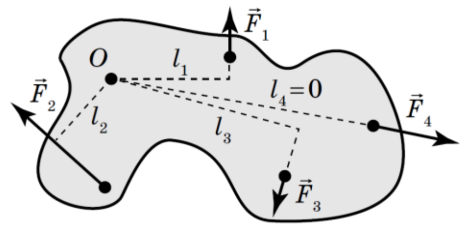


Рис. 38

Сила $\vec{F}_1$ поворачивает тело против часовой стрелки — значения моментов таких сил принято считать *положительными*.

Силы $\vec{F}_2$ и $\vec{F}_3$ поворачивают тело по ходу часовой стрелки — значения моментов таких сил принято считать *отрицательными*.

Момент силы $\vec{F}_4$ равен нулю, и он не может изменить скорость вращательного движения тела.

Поступательно движущееся тело находиться в равновесии, если равнодействующая сил, приложенных к телу, равна нулю:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + ... + \vec{F}_n = 0$$

Правило моментов: тело, имеющее неподвижную ось вращения, находиться в равновесии, если алгебраическая сумма моментов всех сил, действующих на тело, относительно оси вращения равна нулю.

$$M_1 + M_2 + ... + M_n = 0$$

Общее условие равновесия тела: в случае, если тело *может* одновременно совершать поступательное и вращательное движение вокруг некоторой оси, то это тело будет находиться в равновесии, если равнодействующая сил, приложенных к телу, равна нулю и алгебраическая сумма моментов сил, действующих на тело относительно оси вращения равна нулю:

$$\begin{cases} \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + ... + \vec{F}_n = 0, \\ M_1 + M_2 + ... + M_n = 0 \end{cases}$$

ВИДЫ РАВНОВЕСИЯ ТЕЛ		
Устойчивое	**Неустойчивое**	**Безразличное**
При отклонении тела от положения равновесия равнодействующая сила или момент сил возвращают тело в положение равновесия	При отклонении тела от положения равновесия равнодействующая сила или момент сил отклоняют тело от положения равновесия	При отклонении тела от положения равновесия равнодействующая сила или момент сил остаются равными нулю; тело остается в отклоненном положении
$\vec{N}$, $\vec{N}$, $\vec{F}$, $m\vec{g}$, $m\vec{g}$	$\vec{N}$, $\vec{N}$, $\vec{F}$, $m\vec{g}$, $m\vec{g}$	$\vec{N}$, $\vec{N}$, $m\vec{g}$, $m\vec{g}$
Равнодействующая направлена к положению равновесия	Равнодействующая направлена от положения равновесия	Равнодействующая равна нулю
$\vec{N}$, $m\vec{g}$, $m\vec{g}$, ω	$m\vec{g}$, $m\vec{g}$, $\vec{N}$, ω, l	$\vec{N}$, $m\vec{g}$
Силы скомпенсированы, но момент силы $m\vec{g}$ поворачивает тело к положению равновесия	Силы скомпенсированы, но момент силы $m\vec{g}$ еще больше отклоняет тело	Силы скомпенсированы, сумма моментов этих сил равна нулю

Пара сил — две параллельные силы, одинаковые по модулю, но направлены в противоположные стороны.

Пара сил не имеет равнодействующей и поэтому вызывает только вращение тела относительно центра массы. Пара сил характеризуется ее вектором момента ($\vec{M}$), численно равна площади параллелограмма, построенного на этих силах. Вектор момента можно перемещать в любом параллельном ему направлении (рис. 39).

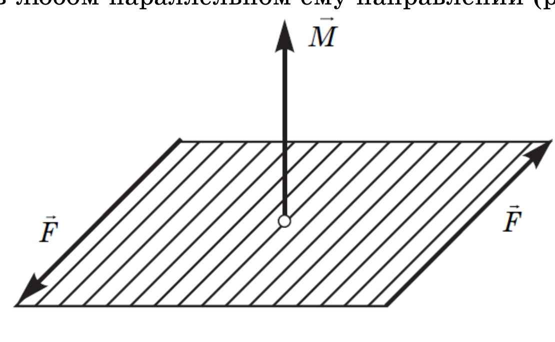


Рис. 39

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

§22 ИМПУЛЬС. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА. РЕАКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Импульс тела $\vec{p}$ — векторная физическая величина, равная произведению массы m тела на скорость $\vec{v}$ его движения:

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

Единица импульса тела в СИ — **килограмм-метр в секунду** (кг · м/с).

Из второго закона Ньютона:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \Rightarrow \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t} = \frac{\vec{F}}{m}, \text{ то есть:}$$

$$\vec{F}\Delta t = m\vec{v} - m\vec{v}_0, \text{ или } \vec{F}\Delta t = \vec{p} - \vec{p}_0$$

Величину $\vec{F}\Delta t$ называют **импульсом силы**. Таким образом, импульс силы равен изменению импульса тела:

$$\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p}.$$

Единица импульса силы в СИ — **ньютон-секунда** (Н · с).

Замкнутая система тел — это такая система тел, на которую не действуют внешние силы, а любые изменения состояния этой системы являются результатом действия внутренних сил системы.

В замкнутой системе тел суммарный импульс тел остается неизменным (сохраняется), то есть выполняется **закон сохранения импульса**: в замкнутой системе тел векторная сумма импульсов тел до взаимодействия равна векторной сумме импульсов тел после взаимодействия:

$$\vec{p}_{01} + \vec{p}_{02} + ... + \vec{p}_{0n} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + ... + \vec{p}_n,$$

где n — количество тел системы.

Учитывая, что импульс тела равен произведению массы m и скорости $\vec{v}$ движения тела, закон сохранения импульса можно записать так:

$$m_1\vec{v}_{01} + m_2\vec{v}_{02} + ... + m_n\vec{v}_{0n} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + ... + m_n\vec{v}_n$$

Закон сохранения импульса выполняется и тогда, когда система не является замкнутой, но действия внешних сил на тела системы скомпенсированы.

Реактивное движение — это движение, возникающее в результате отделения от тела его части с некоторой относительно этого тела скоростью.

Основа реактивного движения — закон сохранения импульса.

Реактивное движение широко используют в технике: простейшие поливные системы, автомобили на реактивной тяге, катера с водометными двигателями, реактивные самолеты, ракеты.

Реактивное движение — это единственный способ передвижения в безвоздушном пространстве.

Ракета — летательный аппарат, который движется в пространстве благодаря реактивной тяге, возникающей при отбросе ракетой части собственной массы.

Отделяемая часть ракеты — струя горячего газа, образующегося при сгорании топлива.

Реактивная сила тяги* — сила реакции (отдачи) струи газа или иного рабочего тела, вытекающего из сопла реактивного двигателя.

---

* Реактивная сила тяги вычисляется по формуле: $\vec{F}_р = -\vec{u}\frac{\Delta m}{\Delta t}$, где $\vec{u}$ — скорость истечения газов относительно ракеты, Δm — расход массы топлива за единицу времени Δt.

§23 МЕХАНИЧЕСКАЯ РАБОТА. МОЩНОСТЬ

Механическая работа (работа силы) A — физическая величина, характеризующая изменение механического состояния тела и равная скалярному произведению вектора силы $\vec{F}$ и вектора перемещения $\vec{s}$ (рис. 40):

$$A = \vec{F} \cdot \vec{s} = Fs\cos\alpha$$

Единица работы в СИ — **джоуль** (Дж).

1 Дж равен механической работе, которую совершает сила 1 Н, перемещая тело на 1 м в направлении действия этой силы (Дж = Н · м).

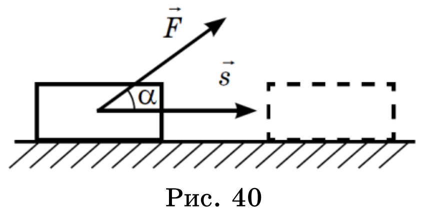


Рис. 40

Значения механической работы		
$A > 0$, если $0° \leqslant \alpha < 90°$	$A < 0$, если $90° < \alpha \leqslant 180°$	$A = 0$, если $\alpha = 90°$

Геометрический смысл работы: если направление силы, действующей на тело, совпадает с направлением движения тела, то работа этой силы численно равна площади фигуры под графиком зависимости модуля силы от модуля перемещения (рис. 41).

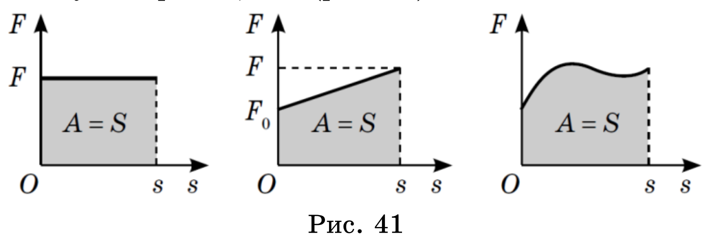


Рис. 41

Мощность N — физическая величина, характеризующая скорость выполнения работы и равная отношению работы A к интервалу времени t, за который эта работа выполнена:

$$N = \frac{A}{t}$$

Единица мощности в СИ — **ватт** (Вт).

1 Вт равен мощности, при которой в течение 1 с выполняется работа 1 Дж (Вт = Дж/с).

Если использовать формулу работы $A = Fs\cos\alpha$, то тяговую мощность прибора можно вычислить по формуле:

$$N = \frac{A}{t} = \frac{Fs\cos\alpha}{t} = \frac{Fvt\cos\alpha}{t} = Fv\cos\alpha.$$

Данная формула справедлива для любого движения: *мощность, которую развивает двигатель в данный момент времени, равна произведению модуля силы тяги двигателя на модуль его мгновенной скорости.*

Иногда используется единица мощности 1 л. с. (лошадиная сила): 1 л. с. = 736 Вт.

$A = Nt$, откуда единица работы в технике — 1 кВт · ч = 3,6 · 10^6 Дж.

§24 ЭНЕРГИЯ. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Существует два способа передачи движения (и соответственно энергии) от одного макротела к другому: в форме работы и в форме теплоты (теплообмена).

Энергия — это единственная мера различных форм движения и взаимодействия материи.

Единица энергии в СИ — **джоуль** (Дж).

Механическая энергия E — физическая величина, характеризующая способность тела (системы тел) совершить работу. Она характеризует механическое движение.

Энергия — одна из характерных свойств материи. На практике механическая энергия частично или полностью превращается в другие виды — внутреннюю, электромагнитного поля.

Энергия характеризует движение системы, а также взаимодействие тел или частиц в системе.

Энергия — функция состояния системы, а работа — функция процесса перехода системы из одного состояния в другое.

Закон сохранения энергии: энергия не возникает и не исчезает, она только превращается из одного вида в другой и передается от одного тела к другому.

Виды энергии:

1. Механическая (потенциальная и кинетическая).
2. Внутренняя.
3. Электромагнитная (электрическая и магнитная).
4. Химическая.
5. Световая.
6. Ядерная (атомная).

Полная энергия тела:

$$E = mc^2.$$

Кинетическая энергия E_k — физическая величина, которая характеризует механическое состояние движущегося тела и равна половине произведения массы m тела на квадрат скорости v его движения[5]:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}$$

Поскольку скорость движения тела является величиной относительной, то есть зависит от выбора системы отсчета, то и кинетическая энергия относительная.

Кинетическая энергия всегда положительна.

Теорема о кинетической энергии: работа равнодействующей всех сил, которые действуют на тело, равна изменению кинетической энергии тела:

$$A = \Delta E_k = E_k - E_{k0} = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}$$

Потенциальная энергия E_p — энергия, которой обладает тело вследствие взаимодействия с другими телами или вследствие взаимодействия частей тела.

В механике различают:

1) Потенциальную энергию тела, поднятого над Землей:

$$E_p = mgh,$$

где h — высота над уровнем, на котором потенциальная энергия системы «Земля — тело» принимается за ноль (нулевой уровень потенциальной энергии) m — масса тела. Данной формулой можно пользоваться, когда тело находится *вблизи поверхности Земли*, где g не зависит от h.

2) Потенциальную энергию упруго деформированного тела:

$$E_p = \frac{kx^2}{2},$$

где k — жесткость тела (пружины или стержня); x — удлинение тела.

3) Потенциальную энергию гравитационного взаимодействия:

$$E_p = -G\frac{mM_З}{R+h}$$

Знак «−» в формуле означает, что вектор перемещения тела противоположен направлению вектору силы тяжести. За нулевой уровень берут точку, бесконечно отдаленную от поверхности Земли.

Теорема о потенциальной энергии: работа силы тяжести и силы упругости равна изменению потенциальной энергии тела, взятой с противоположным знаком:

$$A = -\Delta E_p = E_{p0} - E_p$$

1. Работа силы тяжести (рис. 42, *а*):
$$A = mgh_0 - mgh.$$
2. Работа силы упругости (рис. 42, *б*):
$$A = \frac{kx_0^2}{2} - \frac{kx^2}{2}.$$

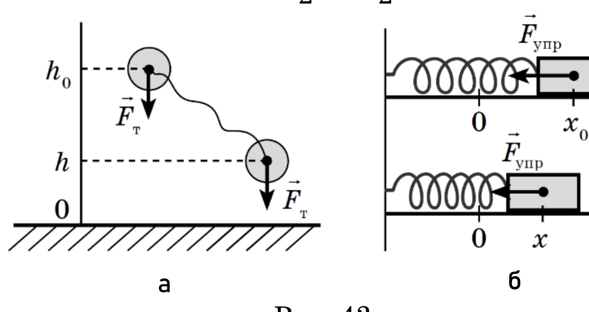


Рис. 42

Кинетическая и потенциальная энергия — функции состояния системы, то есть могут быть точно определены, если известны координаты и скорости движения всех тел системы, а также система отсчета.

Полная механическая энергия системы — сумма кинетической и потенциальной энергий всех тел системы:

$$E = E_k + E_p$$

Закон сохранения полной механической энергии: в замкнутой системе тел, которые взаимодействуют только силами упругости и силами тяжести, полная механическая энергия остается неизменной (сохраняется):

$$E_{k0} + E_{p0} = E_k + E_p$$

В случае если на систему действуют внешние силы (сила трения, сила сопротивления, архимедова сила и др.), полная механическая энергия системы изменяется. Изменение энергии равно работе внешних сил:

$$A = \Delta E = E - E_0.$$

Силы, работа которых не зависит от формы траектории, а определяются только начальным и конечным механическими состояниями тела (системы тел), называют **потенциальными**, или **консервативными силами** (силы тяжести, упругости, кулоновские силы).

---

[5] По данной формуле определяют *кинетическую энергию поступательного движения тела*. Если тело еще и вращается, то кроме кинетической энергии поступательного движения оно также обладает *кинетической энергией вращательного движения*.

§25 МЕХАНИЧЕСКИЙ УДАР

Удар (столкновение) — это кратковременное взаимодействие тел, в ходе которого они непосредственно касаются друг друга (рис. 43, *а*, *б*).

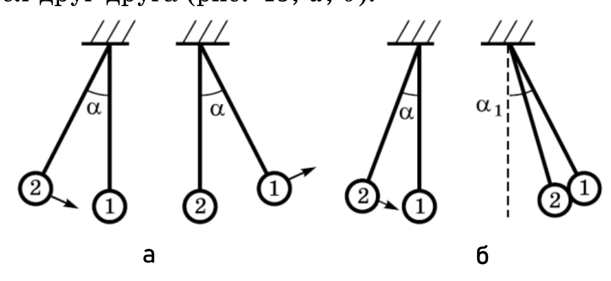


Рис. 43

Упругий удар — столкновение тел, при котором деформация тел полностью исчезает после прекращения взаимодействия (см. рис. 43, *а*; рис. 44).

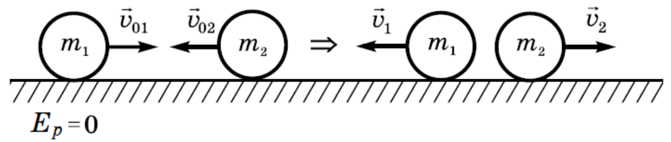


Рис. 44

Во время упругого удара сохраняется суммарный импульс и суммарная кинетическая энергия тел:

$$\begin{cases} m_1\vec{v}_{01} + m_2\vec{v}_{02} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2, \\ \dfrac{m_1 v_{01}^2}{2} + \dfrac{m_2 v_{02}^2}{2} = \dfrac{m_1 v_1^2}{2} + \dfrac{m_2 v_2^2}{2}. \end{cases}$$

При упругом ударе внутреннее состояние тел не изменяется, кинетическая энергия не переходит в другие формы.

Абсолютно неупругий удар — столкновение тел, при котором тела взаимодействуют только силами вязкого трения, в результате которого тела движутся как одно целое (рис. 43, *б*; рис. 45).

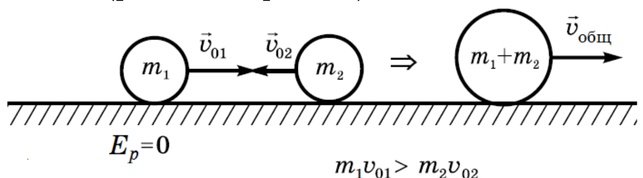


Рис. 45

После абсолютно неупругого удара оба тела движутся в направлении движения тела, которое до столкновения имело больший импульс.

При абсолютно неупругом ударе выполняется только закон сохранения импульса, который имеет вид:

$$\vec{p}_{01} + \vec{p}_{02} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2, \text{ или } m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = (m_1 + m_2)\vec{v}_{общ}.$$

Если во время неупругого удара изменение внутренней энергии[6] связано только с изменением температуры тела или его агрегатного состояния, то:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{(m_1 + m_2)v_{общ}^2}{2} + \Delta U,$$

где $\Delta U = Q$ — энергия, которая перешла в другие формы (обычно это количество теплоты, выделяющееся в результате столкновения тел). Эта запись еще имеет вид: $E_{k0} = E_k + \Delta U$.

Если скорости движения тел до и после удара (упругого или неупругого) направлены вдоль прямой, проходящей через центры масс этих тел, такой удар называют **центральным**.

---

[6] *Внутренняя энергия тела* — это энергия движения и взаимодействия молекул (атомов, ионов), из которых состоит тело. С увеличением температуры тела его внутренняя энергия увеличивается.

§26 КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ. ПРОСТЫЕ МЕХАНИЗМЫ

На практике полезная работа, которую мы выполняем с помощью любого механизма, всегда меньше полною (затраченной) работы: $A_п < A_з$.

Какую часть полной работы механизм превращает в полезную, показывает физическая величина, которая называется *коэффициентом полезного действия*.

Коэффициент полезного действия (КПД) механизма η — это физическая величина, характеризующая механизм и равная отношению полезной работы к полной (затраченной) работе:

$$\eta = \frac{A_п}{A_з}, \text{ или } \eta = \frac{N_п}{N_з}$$

Обычно КПД представляют в процентах:

$$\eta = \frac{A_п}{A_з} \cdot 100\ \%, \text{ или } \eta = \frac{N_п}{N_з} \cdot 100\ \%$$

Поскольку при использовании механизмов полезная работа всегда меньше полной (полезная мощность меньше полной), КПД любого механизма всегда меньше 100 %.

Если механическая работа $A_п$ выполняется за счет предоставления телу определенного количества теплоты Q (поршень в двигателе автомобиля движется за счет количества теплоты, которое выделяется при сгорании топлива), то КПД рассчитывается по формуле:

$$\eta = \frac{A_п}{Q_з} \cdot 100\ \%.$$

Если тело нагревается или плавится за счет осуществления работы (шар нагревается, ударяясь о препятствие), то КПД рассчитывается по формуле:

$$\eta = \frac{Q_п}{A_з} \cdot 100\ \%.$$

Простые механизмы — это устройства для преобразования силы. К простым механизмам относят рычаг и его разновидности (подвижный и неподвижный блоки, коловорот); наклонная плоскость и ее разновидности (клин, винт).

«Золотое правило» механики: ни один из простых механизмов не дает выигрыша в работе; во сколько раз выигрываем в силе, во столько же раз проигрываем в расстоянии.

На практике осуществленная с помощью механизма полная работа всегда несколько больше полезной. Часть работы расходуется на преодоление силы трения.

Рычаг — это твердое тело, которое может вращаться вокруг неподвижной оси — оси вращения.

Правило равновесия рычага (установлено Архимедом): при отсутствии трения в оси рычага рычаг находится в равновесии, когда действующие на него силы ($\vec{F}_1, \vec{F}_2$) обратно пропорциональны плечам сил (l_1, l_2) (рис. 46)[7]:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}$$

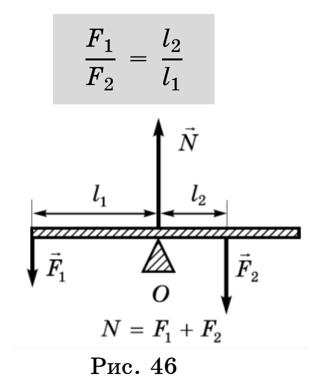


Рис. 46

---

[7] Следствие правила моментов.

Если с помощью рычага поднимают груз весом $\vec{P}$, прикладывая силу $\vec{F}$, а в оси рычага есть трение, то

$$\eta = \frac{A_п}{A_з} = \frac{Ph}{Fs} = \frac{Pl_1}{Fl_2} \text{ (рис. 47).}$$

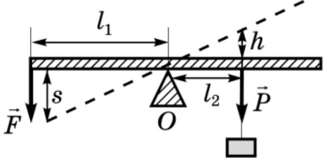


Рис. 47

Блок — это простой механизм, имеющий форму колеса с желобом по ободу, через который переброшен шнур (канат, веревка).

Неподвижным блоком называют такой блок, ось которого закреплена и при подъеме грузов не меняет своего положения.

Неподвижный блок не дает выигрыша в силе, но дает возможность изменять направление действия силы (рис. 48, *а*).

Если с помощью недвижимого блока поднимают груз весом $\vec{P}$, прикладывая силу $\vec{F}$, а в оси блока есть трение, то КПД недвижимого блока рассчитывается по формуле:

$$\eta = \frac{A_п}{A_з} = \frac{Ph}{Fs} = \frac{P}{F}.$$

Подвижный блок поднимается и опускается вместе с грузом.

При отсутствии трения и пренебрежимо малой массе блока подвижный блок дает выигрыш в силе в 2 раза (рис. 48, *б*). Тогда выигрыш в силе будет сопровождаться таким же проигрышем в расстоянии.

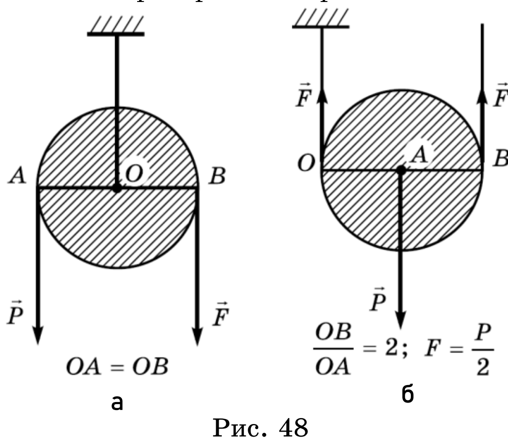


Рис. 48

Подвижный блок также применяют для получения выигрыша в расстоянии (выигрыша в скорости движения).

Если с помощью подвижного блока поднимают груз весом $\vec{P}$, прикладывая силу $\vec{F}$, а в оси блока есть трение и массой блока пренебречь нельзя, то КПД подвижного блока рассчитывается по формуле:

$$\eta = \frac{A_п}{A_з} = \frac{Ph}{Fs} = \frac{P}{2F}.$$

Наклонная плоскость — простой механизм в виде плоскости, установленной под острым углом к горизонтальной поверхности (рис. 49). С помощью наклонной плоскости можно поднимать тяжелые предметы, прикладывая к ним относительно небольшую силу.

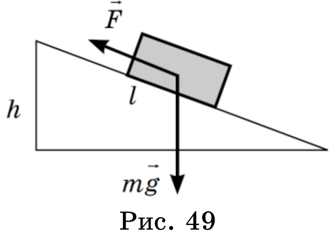


Рис. 49

При отсутствии трения модуль силы $\vec{F}$, которую необходимо приложить к телу, чтобы равномерно поднять его по наклонной плоскости, во столько же раз меньше модуля силы тяжести $\vec{F}_т = m\vec{g}$, во сколько раз высота h наклонной плоскости меньше ее длины l:

$$\frac{F}{F_т} = \frac{h}{l}$$

Если между телом и наклонной плоскостью есть трение, то КПД наклонной плоскости рассчитывается по формуле:

$$\eta = \frac{A_п}{A_з} = \frac{mgh}{Fl}.$$

Клин — разновидность наклонной плоскости.

Клин является главной частью, например, ножа, ножниц, топора, рубанка. Чтобы клин находился в состоянии покоя или равномерного движения (без трения), необходимо приложить к нему силу, перпендикулярную к его основанию (обуха), во столько раз меньше силы, действующей перпендикулярно боковой грани клина, во сколько раз основание (AB) меньше длины боковой поверхности клина (AC) (рис. 50).

Винт — цилиндрическое тело с резьбой, которая наносится по винтовой линии.

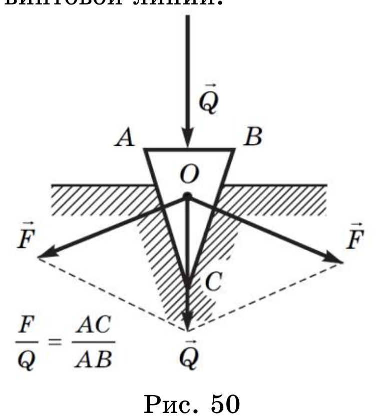


Рис. 50

§27 ДАВЛЕНИЕ. ЗАКОН ПАСКАЛЯ

Гидроаэростатика — раздел механики, изучающий состояние равновесия жидкости или газа.

Давление — это физическая величина, которая характеризует результат действия силы и равна отношению силы, действующей перпендикулярно поверхности, к площади этой поверхности:

$$p = \frac{F_\perp}{S}$$

Здесь p — давление, $F_\perp$ — модуль силы, действующей на поверхность, перпендикулярно этой поверхности; S — площадь поверхности, на которую действует эта сила.

Единица давления в СИ — **паскаль** (Па).

1 Па — это давление, которое создает сила 1 Н, действуя перпендикулярно поверхности площадью 1 м^2 (Па = Н/м^2).

Сила давления — сила, действующая перпендикулярно к поверхности: $F_\perp = pS$.

Твердое тело создает давление только на ту часть поверхности, которой оно касается.

Вследствие своей текучести жидкость оказывает давление на дно и боковые стенки сосуда, а также на любое тело, погруженное в данную жидкость.

Газ оказывает давление на поверхность в результате многочисленных ударов об эту поверхность частиц газа. Давление газа возрастает при увеличении плотности или температуры газа и уменьшается при уменьшении плотности или температуры газа.

В состоянии равновесия давление внутри жидкости или газа на одном уровне одинаковый во всех направлениях.

Закон Паскаля: давление, создаваемое на поверхность неподвижной жидкости (или на газ), передается жидкостью (газом) одинаково во всех направлениях.

На законе Паскаля основана система торможения многих транспортных средств, действие домкратов, насосов и других *гидравлических машин*.

Гидравлический пресс — это простейшая гидравлическая машина, которую используют для создания больших сил давления.

Гидравлический пресс состоит из двух соединенных между собой цилиндров разного диаметра, заполненных рабочей жидкостью (чаще машинным маслом) и закрытых подвижными поршнями (рис. 51).

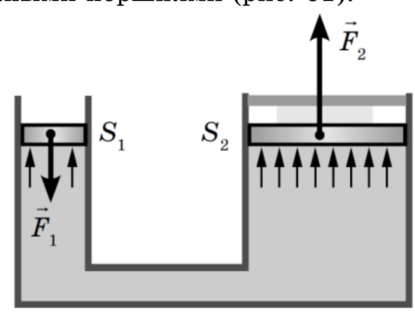


Рис. 51

Если к поршню меньшего цилиндра приложить силу $\vec{F}_1$, то эта сила создаст на поверхность жидкости некоторое дополнительное давление p: $p = \frac{F_1}{S_1}$, где S_1 — площадь меньшего поршня.

Согласно закону Паскаля это дополнительное давление будет передаваться во все точки жидкости, заполняющей сообщающиеся цилиндры. Следовательно, жидкость начнет давить на поршень большего цилиндра с некоторой силой $\vec{F}_2$: $F_2 = pS_2$, где S_2 — площадь большего поршня; p — дополнительное давление.

Сила, действующая со стороны жидкости на большой поршень гидравлической машины, больше силы, действующей на малый поршень, во столько раз, во сколько раз площадь большого поршня больше площади малого:

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}$$

Гидравлический пресс позволяет получить значительный выигрыш в силе: *чем больше будут различаться между собой площади поршней, тем бóльшим будет выигрыш в силе.*

§28 ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ. СООБЩАЮЩИЕСЯ СОСУДЫ

Гидростатическое давление — давление неподвижной жидкости на дно сосуда, обусловленное ее весом.

Гидростатическое давление зависит только от плотности жидкости $\rho_ж$ и высоты h столба жидкости в сосуде:

$$p = \rho_ж g h$$

По этой формуле рассчитывают давление слоя жидкости высотой h:

- на дно сосуда;
- на любое тело, погруженное в жидкость на глубину h;
- на стенки сосуда на глубине h.

Если жидкость находится под внешним давлением p_0 (например, под давлением воздуха), то давление внутри жидкости на глубине h равно (рис. 52):

$$p = p_0 + \rho_ж g h$$

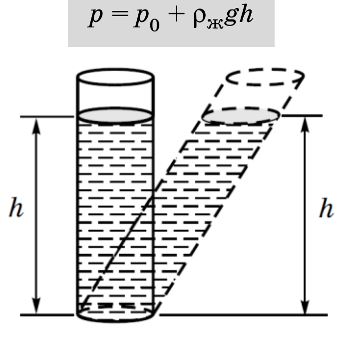


Рис. 52

Гидростатический парадокс — свойство жидкостей, заключающееся в том, что сила тяжести жидкости, налитой в сосуд, может отличаться от силы, с которой эта жидкость действует на дно сосуда. Если взять несколько сосудов различной формы, заполненных одинаковой жидкостью до одного уровня (рис. 53), то, несмотря на то, что вес жидкости в сосудах будет разным, давление, создаваемое этой жидкостью на дно сосуда, будет одинаковым.

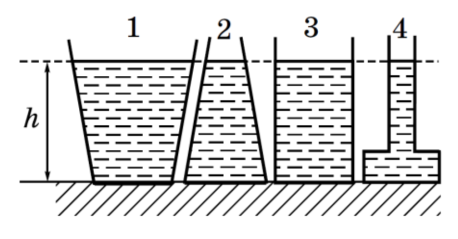


Рис. 53

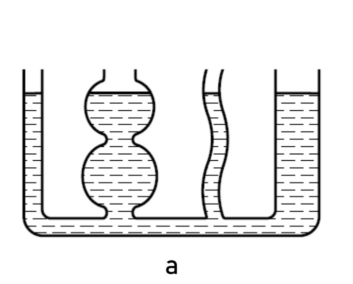
Сообщающиеся сосуды — это сосуды, которые соединены между собой в нижней части так, что жидкость может перетекать из одного сосуда в другой.

В открытых сообщающихся сосудах различных форм и размеров однородная неподвижная жидкость устанавливается на одном уровне (рис. 54, *а*).

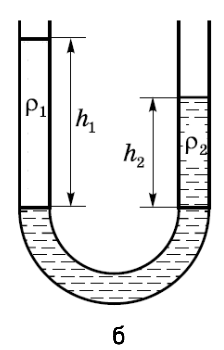
Закон сообщающихся сосудов: в открытых сообщающихся сосудах с разнородными не смешиваемыми жидкостями высоты столбов жидкостей над уровнем их распределения (рис. 54, *б*) обратно пропорциональны плотностям этих жидкостей:

$\rho_1 g h_1 = \rho_2 g h_2 \Rightarrow \rho_1 h_1 = \rho_2 h_2$, то есть:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$



а



б

Рис. 54

§29 АРХИМЕДОВА СИЛА. УСЛОВИЯ ПЛАВАНИЯ ТЕЛ

Закон Архимеда: на тело, погруженное в жидкость или газ, действует выталкивающая (архимедова) $\vec{F}_{арх}$ сила, равная весу жидкости или газа в объеме погруженной части тела:

$$F_{арх} = \rho_ж g V_п,$$

где $\rho_ж$ — плотность жидкость, g — ускорение свободного падения, $V_п$ — объем погруженной части тела.

Архимедова сила приложена к центру массы вытесненной телом жидкости и направлена вертикально вверх (рис. 55, *а*).

Архимедова сила обусловлена разницей давлений жидкости или газа на верхнюю и нижнюю части тела, при этом атмосферное давление взаимно компенсируется.

Если тело плотно прилегает к дну сосуда, то есть между телом и дном сосуда нет жидкости, то архимедова сила на тело не действует, а сила давления жидкости вместе с атмосферой направлена вертикально вниз (рис. 55, *б*).

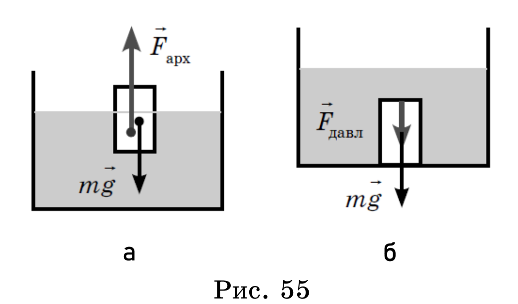


Рис. 55

УСЛОВИЯ ПЛАВАНИЯ ТЕЛ		
Поведение тела	**Сравнение силы тяжести и архимедовой силы**	**Сравнение плотности тела и плотности жидкости**
погружение	$F_{арх} < mg$	$\rho_{тела} > \rho_ж$
плавание внутри жидкости	$F_{арх} = mg$	$\rho_{тела} = \rho_ж$
всплытие	$F_{арх} > mg$	$\rho_{тела} < \rho_ж$
плавание на поверхности жидкости	$F_{арх} = mg$	$\rho_{тела} < \rho_ж$

Плавание суден

Тяжелые грузы и двигатели располагаются в нижней части судна, чтобы центр тяжести 2 был ниже точки приложения архимедовой силы 1, что обеспечивает устойчивость судна (при наклоне судна становятся парой сил, которые возвращают судно в вертикальное положение) (рис. 56).

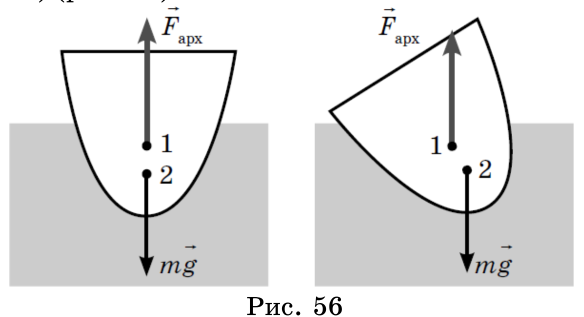


Рис. 56

Вес воды, которую вытесняет судно, погруженное в воду до *ватерлинии* (наибольшая допустимая осадка, обозначенная на корпусе красной линией), то есть архимедова сила, действующая на полностью нагруженное судно, называется **полным водоизмещением судна**:

$$F_{арх} = F_т = (m_{судна} + m_{груза})g$$

Грузоподъемность судна — максимальный вес груза, который судно может взять на борт, — это разность между полным водоизмещением судна и его весом:

$$P_{груз} = P_{водоизм} - P_{судна}.$$

Воздухоплавание

Разность между выталкивающей (архимедовой) силой и силой тяжести представляет собой **подъемную силу** воздушного шара:

$$F_{под} = F_{арх} - F_т,$$

$$F_{под} = (\rho_{возд} - \rho_{газа})gV_{газа}.$$

§30 АТМОСФЕРНОЕ ДАВЛЕНИЕ И ЕГО ИЗМЕРЕНИЕ

Атмосфера — это воздушная оболочка Земли. Атмосфера начинается у поверхности Земли и простирается в космическое пространство примерно на 3000 км.

Существование атмосферы объясняется следующим:
- воздух имеет массу, поэтому он притягивается к Земле благодаря гравитационному взаимодействию;
- молекулы газов, составляющих атмосферу, находятся в непрерывном движении, поэтому они не падают на Землю, а «летают» в пространстве у поверхности Земли.

Под действием силы тяжести верхние слои атмосферы давят на нижние, поэтому воздушный слой вокруг поверхности Земли сжатый больше и, согласно закону Паскаля, давит на поверхность Земли и на все тела вблизи нее. Это давление и называют **атмосферным давлением**.

Именно атмосферное давление вызывает поднятие жидкости за поршнем (рис. 57, *а*), например в всасывающих насосах и шприцах. Если поднимать ручку поршня, то атмосферное давление, воздействуя на свободную поверхность жидкости в сосуде, будет нагнетать жидкость по трубке вверх. Жидкость подниматься по поршню до тех пор, пока атмосферное давление не сравнится с гидростатическим давлением столба жидкости под поршнем:

$$p_{атм} = p_{гидр} = \rho_ж gh.$$

Для определения атмосферного давления нельзя пользоваться формулой $p = \rho_{возд}gh$, поскольку плотность воздуха с высотой уменьшается. Атмосферное давление измеряют **барометрами**. Существуют два вида барометров: *жидкостные* (трубка Торричелли) и *металлические* (барометр-анероид).

Жидкостный барометр (трубка Торричелли)

Впервые атмосферное давление был измерен *Э. Торричелли*. В его опыте атмосферное давление уравновешивается давлением столба ртути в стеклянной трубке (рис. 57, *б*). Над ртутью образуются насыщенные пары ртути, давление которых очень мало, и им пренебрегают, поэтому:

$$p_{атм} = \rho_{рт}gh_{рт}.$$

Атмосферное давление, равное давлению столба ртути высотой $h_{рт}$ = 760 мм при 0 °С, называется **нормальным атмосферным давлением**:

1 мм рт. ст. = 133,3 Па, $p_{атм} \approx$ 101 кПа.

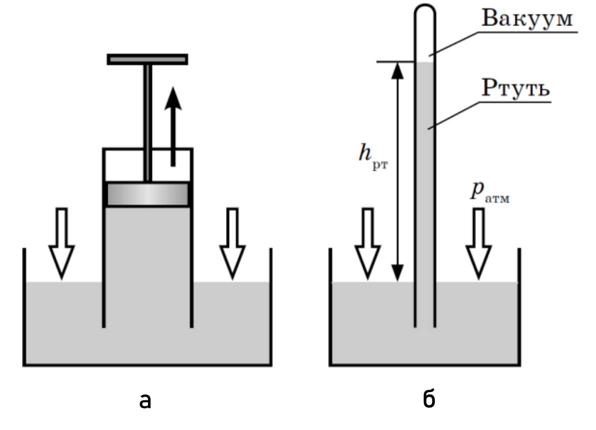


Рис. 57

Поскольку давление столба ртути обусловлено его весом, то ртутные барометры нельзя использовать:
- в невесомости ($P_{рт} = 0$, поэтому благодаря давлению атмосферы трубка будет полностью заполненной);
- при движении с ускорением (если ускорение направлено вверх, то вес ртути увеличится, поэтому уровень ртути в трубке уменьшится, а если ускорение направлено вниз, то вес ртути уменьшится, а уровень ртути в трубке увеличится).

Атмосферное давление с высотой уменьшается на 1 мм рт. ст. в среднем на каждые 12 м подъема (относительно Земли) (рис. 58):

$$\frac{\Delta h}{\Delta p} = 12\ \frac{м}{мм\ рт.\ ст.} = 9\ \frac{м}{гПа}.$$

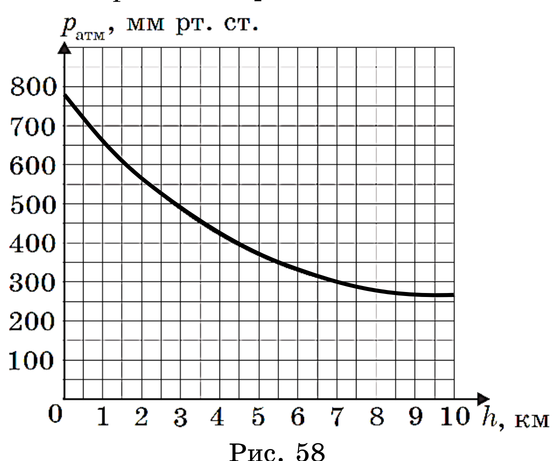


Рис. 58

Металлический барометр (барометр-анероид)

Барометр-анероид состоит из металлической герметичной гофрированной коробочки 1, которая сжимается при увеличении атмосферного давления и расширяется при его уменьшении (рис. 59).

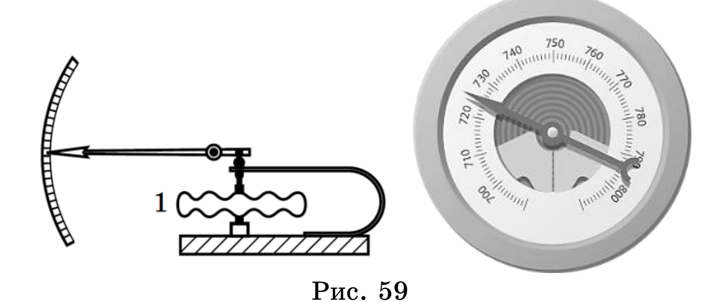


Рис. 59

Барометры-анероиды менее точны, чем ртутные барометры, но они более удобны в использовании, легкие, компактные и безопасные.

Манометры

Для измерения давления, большего или меньшего от атмосферного, используют жидкостные или металлические манометры.

Жидкостные манометры представляют собой сообщающиеся сосуды, заполненные однородной жидкостью. Один конец манометра соединен с сосудом, в котором измеряется давление газа, а другой находится под атмосферным давлением (рис. 60, *а*).

Основная часть металлического манометра — согнутая в дугу упругая металлическая трубочка 1, один конец которой закрыт, а другой с помощью крана 2 соединен с сосудом, в которой измеряется давление (рис. 60, *б*).

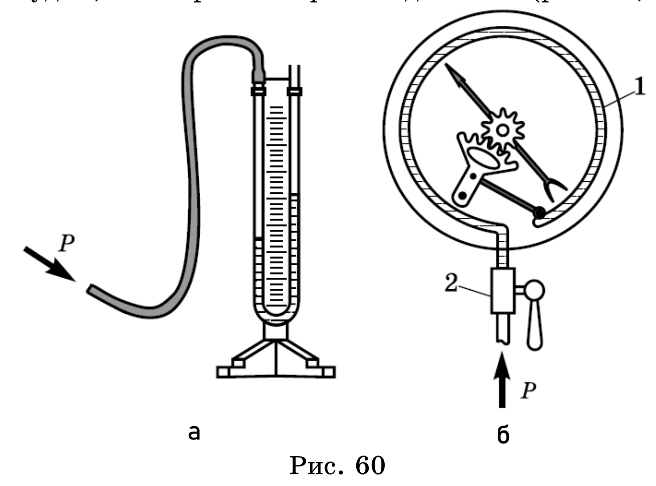


Рис. 60

§31 ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ ИЛИ ГАЗА. ПОДЪЕМНАЯ СИЛА КРЫЛА

Гидроаэродинамика — раздел механики, изучающий движение (течение) жидкостей или газов, а также их взаимодействие с телами, движущихся через них.

Закон постоянства потока*: при стационарном течении идеальной (несжимаемой) жидкости через любое сечение потока проходит одинаковое количество жидкости.

Уравнение неразрывности струи: для двух произвольных сечений потока произведение скорости течения v несжимаемой жидкости на поперечное сечение S трубки есть величина постоянная для данной трубки течения (рис. 61):

$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$

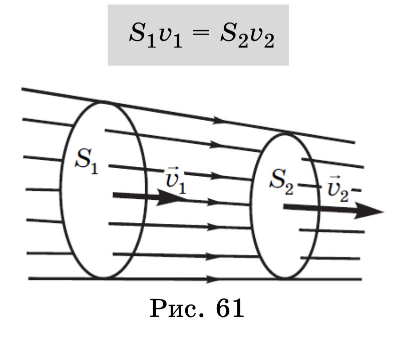


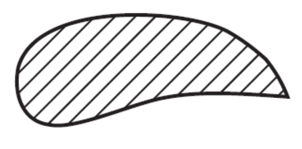
Рис. 61

Закон Бернулли**: при стационарном движении жидкости давление жидкости меньше там, где скорость течения больше, и наоборот, давление жидкости больше там, где скорость течения меньше.

Закон Бернулли является следствием закона сохранения механической энергии: жидкость получает кинетическую энергию (увеличивает скорость своего движения) благодаря тому, что потенциальная энергия упругого взаимодействия молекул жидкости уменьшается (и наоборот). Если поток жидкости не горизонтальный, изменение кинетической энергии жидкости происходит еще и за счет изменения ее потенциальной энергии гравитационного взаимодействия с Землей.

Подъемная сила крыла самолета

Профиль крыла самолета выпуклый сверху и вогнутый снизу (рис. 62).


Рис. 62

Самолет держится в воздухе благодаря силе давления, создающей подъемную силу.

Закон Бернулли объясняет одну из причин возникновения подъемной силы крыла самолета: *аэродинамическая форма крыла заставляет воздух над его верхней поверхностью двигаться с большей скоростью, поэтому давление над крылом меньше, чем давление под крылом* (рис. 63).

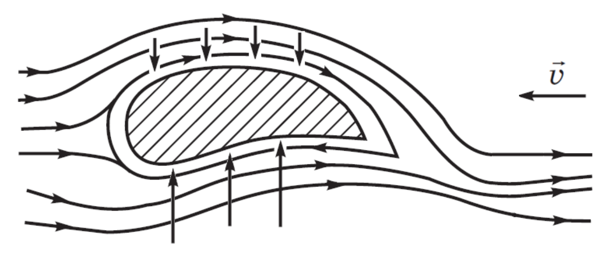


Рис. 63

Перепад давления, который возникает, вызывает *аэродинамическую силу*, направленную перпендикулярно к касательной к нижней плоскости крыла.

Аэродинамическая сила $\vec{F}_{\text{а.д}}$ раскладывается на две составляющие: подъемную силу $\vec{F}_{\text{под}}$ и силу сопротивления $\vec{F}_{\text{сопр}}$ (рис. 64).

Благодаря наличию *угла атаки* α в воздух поднимаются самолеты с симметричным профилем крыла.

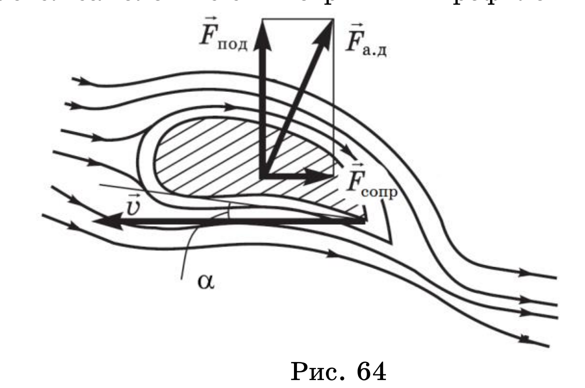


Рис. 64

---

* Этот закон записывают формулой: $\frac{m}{t} = \rho S v = \text{const}$, где $\frac{m}{t}$ — скорость v стационарного потока жидкости площадью поперечного сечения S и плотностью ρ за единицу времени.

** Для стационарного потока жидкости является действительным *уравнение Бернулли*: $p + \rho g h + \frac{\rho v^2}{2} = \text{const}$, где p — статическое (постоянное) давление, $\rho g h = p_{\text{гидр}}$ — гидростатическое давление, $\frac{\rho v^2}{2}$ — динамическое давление (ρ — плотность жидкости, v — скорость потока).

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

§32 КОЛЕБАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Колебания — движения или изменения состояния, которые точно или приблизительно повторяются с течением времени. Если колебания повторяются через одинаковые промежутки времени, то их называют *периодическими*.

По природе колебания бывают механические и электромагнитные. Механические колебания (колебательное движение) осуществляют маятники часов, мембраны телефонов, струны гитары и др. Электромагнитные колебания возникают, в частности, в колебательном контуре, генераторах переменного тока.

По условиям существования колебания делятся на *свободные, вынужденные и автоколебания*.

Вынужденные колебания — колебания, которые происходят под действием внешней силы, периодически изменяющейся. Вынужденные колебания осуществляют деревья и фрагменты сооружений под напором ветра, пол машинного зала на заводе; мембрана микрофона.

Когда внешняя сила исчезает, вынужденные колебания прекращаются.

Свободные колебания — колебания, происходящие под действием внутренних сил системы и возникающие в системе после того, как она была выведена из положения равновесия и предоставлена самой себе (колебания тела на пружине, листья на дереве, струны, электромагнитные колебания в колебательном контуре и т. д.).

Условия возникновения свободных колебаний

1. При выведении тела из положения равновесия возникает сила (равнодействующая сил), поворачивающая тело в это положение, то есть системе должна быть передана избыточная энергия.
2. Потери энергии во время колебаний должны быть незначительными (трение в системе должно быть незначительным), иначе колебания быстро затухнут или даже не возникнут (затухают колебания на пружине тела, опущенного в жидкость).

Колебательная система — система тел, в которой могут возникать свободные колебания. Силы, действующие между телами колебательной системы, называют *внутренними*.

Смещение x — это расстояние от положения равновесия до точки, в которой в данный момент времени находится колеблющееся тело (см. рис. 67).

Амплитуда колебаний A — это физическая величина, равная максимальному смещению:

$$A = x_{max}$$

Единица смещения и амплитуды в СИ — **метр** (м).

Во время механических колебаний за одно полное колебание тело проходит путь l_0, равный четырем амплитудам (см. рис. 67): $l_0 = 4A$.

Незатухающие колебания — колебания, амплитуда которых со временем не изменяется (рис. 65).

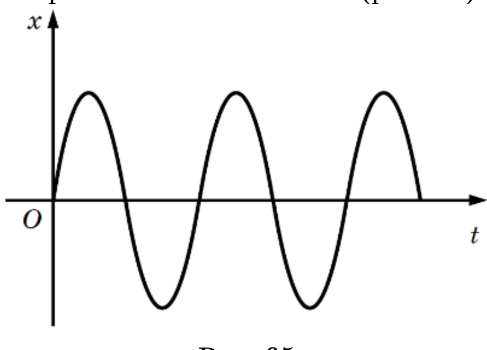


Рис. 65

Затухающие колебания — колебания, амплитуда которых со временем уменьшается и через некоторое время колебания прекращаются (рис. 66).

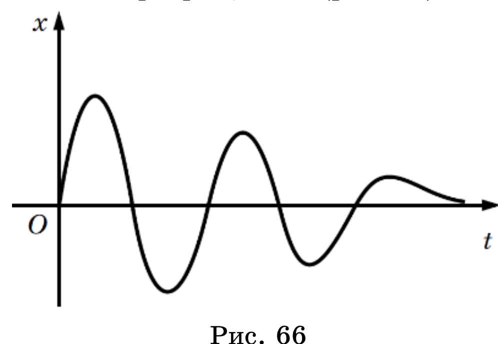


Рис. 66

В любой реальной колебательной системе всегда есть потери энергии, поэтому *свободные колебания всегда являются затухающими*.

Автоколебания — незатухающие колебания, которые могут существовать в системе за счет поступления энергии от постоянного источника, которое регулируется самой системой (колебания маятника часов, электромагнитные колебания в генераторе незатухающих электромагнитных колебаний).

В отличие от свободных колебаний автоколебания не затухают постепенно, а их амплитуда не зависит от энергии, которая сообщена колебательной системе перед началом колебаний.

Период колебаний T — физическая величина, равная интервалу времени, за которое совершается одно полное колебание (рис. 67, *а*, *б*):

$$T = \frac{t}{N},$$

где N — количество колебаний за интервал времени t.

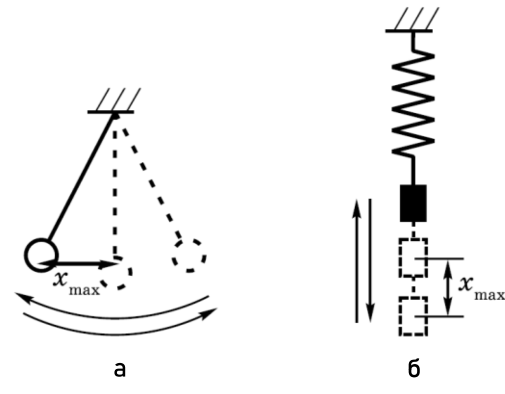


Рис. 67

Единица периода колебаний в СИ — **секунда** (с).

Частота колебаний ν — физическая величина, количественно равна числу полных колебаний, осуществляет тело за единицу времени:

$$\nu = \frac{N}{t}$$

Единица частоты колебаний в СИ — **герц** (Гц).

Если тело за 1 секунду осуществляет 1 колебание, то частота его колебаний равна 1 герцу (Гц, или $с^{-1}$).

Период и частота колебаний — *взаимно обратные величины*:

$$T = \frac{1}{\nu};\ \nu = \frac{1}{T}$$

Циклическая частота ω — физическая величина, количественно равна числу полных колебаний за 2π секунд:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$$

Единица циклической частоты в СИ — **радиан в секунду** (рад/с, или $с^{-1}$).

§33 ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Колебания, при которых координата x колеблющегося тела изменяется с течением времени по закону косинуса (или синуса), называют **гармоническими колебаниями** (рис. 68, *а*, *б*):

$$x = A\cos(\omega t + \varphi_0), \text{ или } x = A\sin(\omega t + \varphi_0)$$

Здесь x — мгновенное значение колебательной величины (смещение от положения равновесия); $A = x_{max}$ — амплитуда колебаний; $\varphi = \omega t + \varphi_0$ — фаза колебаний; φ_0 — начальная фаза колебаний.

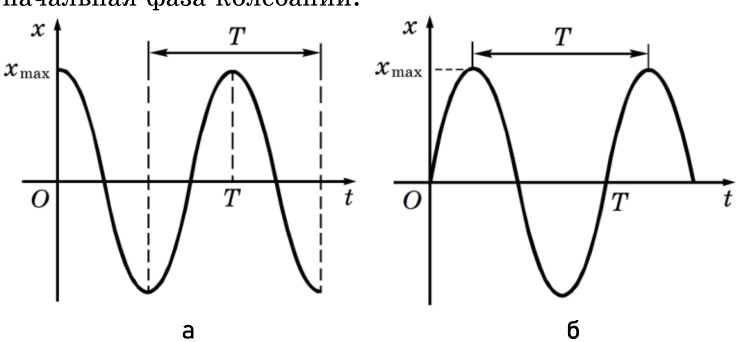


Рис. 68

Фаза колебаний — физическая величина, характеризующая состояние колебательной системы в данный момент времени.

Фаза колебаний определяется их периодом ($\omega = \frac{2\pi}{T}$), моментом времени t, в который фиксируется значение переменной величины, и **начальной фазой колебаний** φ_0 — фазой колебаний в момент начала отсчета времени ($t = 0$).

Свободные колебания удобнее описывать функцией косинуса:

$$x = A\cos\omega t$$

Вынужденные колебания удобнее описывать функцией синуса:

$$x = A\sin\omega t$$

Скорость движения тела, совершающего гармонические колебания, — первая производная координаты от времени:

$$v_x = x'(t)$$

$$v = -x_{max}\omega\sin\omega t, \text{ или } v = x_{max}\omega\cos\omega t$$

Ускорение движения тела, совершающего гармонические колебания, — первая производная скорости от времени, вторая производная координаты от времени:

$$a_x = v_x'(t) = x''(t)$$

$$a = -x_{max}\omega^2\cos\omega t, \text{ или } a = x_{max}\omega^2\sin\omega t$$

Если координата тела изменяется по гармоническому закону (по закону косинуса или синуса), скорость и ускорение движения тела тоже изменяются гармонически. При этом выполняются соотношения:

$$v_{max} = x_{max}\omega \; ; \; a_{max} = x_{max}\omega^2$$

Гармоническое колебание — такое колебание, ускорение которого пропорционально величине смещения x и имеет противоположное ему направление:

$$a = -x\omega^2$$

Сила, которая обуславливает гармонические колебания, прямо пропорциональна абсолютному смещению тела от положения равновесия и направлена противоположно смещению:

$$\vec{F} = m\vec{a}, \; F_x = -mx\omega^2.$$

§34 СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ МАЯТНИКОВ

Пружинный маятник — колебательная система, в которой колебания происходят под влиянием сил упругости в пределах упругости пружины (рис. 69):

$$F_x = -kx, \; a_x = -\frac{kx}{m}.$$

Рис. 69

Причины свободных колебаний пружинного маятника

1. Действующая на тело сила упругости всегда направлена к положению равновесия.
2. Колеблющееся тело инертно.

Период свободных колебаний пружинного маятника не зависит ни от амплитуды колебаний, ни от места расположения маятника (на поверхности Земли или Луны, в космическом корабле и т. д.), — он определяется только характеристиками самой колебательной системы «тело — пружина» и определяется по формуле:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}},$$

где m — масса тела, k — жесткость пружины.

Математический маятник — физическая модель, представляющая собой материальную точку, которая подвешена на невесомой нерастяжимой нити и совершает колебания под действием силы тяжести (рис. 70[8]). Колебательную систему математического маятника образуют нить, присоединенное к ней тело и Земля.

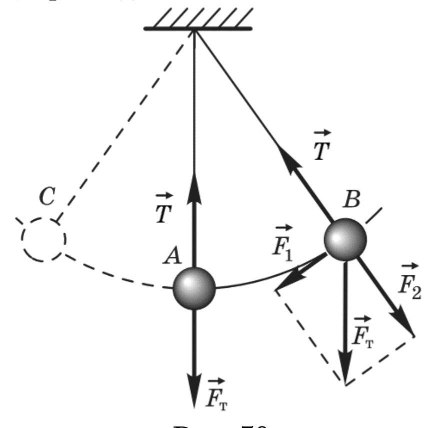


Рис. 70

[8] Колебания происходят под действием равнодействующей силы $\vec{F}_1$ (составляющей силы тяжести $\vec{F}_т$).

Математический маятник — это физическая модель.

При *малых* углах отклонения (3–5°) от положения равновесия колебания математического маятника являются гармоническими.

Причины свободных колебаний математического маятника

1. Действие на маятник силы натяжения и силы тяжести, препятствующей его смещению из положения равновесия.
2. Колеблющееся тело инертно.

Период колебаний математического маятника не зависит от массы маятника, а определяется только длиной нити и ускорением свободного падения в том месте, где расположен маятник и определяется по *формуле Гюйгенса*:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

где l — длина нити маятника, g — ускорение свободного падения.

Если маятник движется с ускорением $\vec{a}$, то период колебаний меняется:

1. Ускорение направлено вверх:
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g+a}}.$$
2. Ускорение направлено вниз:
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g-a}}.$$
3. Ускорение направлено горизонтально:
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{\sqrt{g^2+a^2}}}.$$

Если потерями энергии можно пренебречь, то во время свободных колебаний маятника *полная энергия остается неизменной*, а его потенциальная и кинетическая энергии непрерывно изменяются: *потенциальная энергия максимальна в точках поворота и равна нулю в момент прохождения маятником положения равновесия; кинетическая энергия в точках поворота равна нулю и достигает максимального значения в момент прохождения маятником положения равновесия*:

$$E_{\text{полная}} = E_{k_{\max}} = E_{p_{\max}} = E_k + E_p$$

Любое твердое тело, которое совершает или может совершать колебания относительно оси, проходящей через точку подвеса, называют **физическим маятником** (рис. 71).

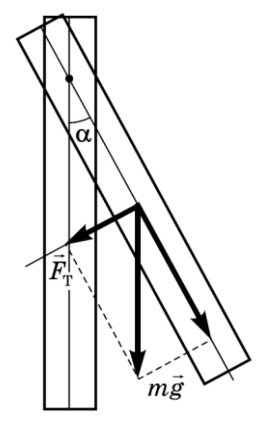


Рис. 71

При небольших углах отклонения от положения равновесия он совершает гармонические колебания подобно математическому маятнику.

§35 РЕЗОНАНС

Частоту свободных колебаний колебательной системы называют **собственной частотой колебаний.**

Если на систему влиять внешней силой, которая меняется периодически, то в системе возникнут вынужденные колебания. Амплитуда вынужденных колебаний резко увеличивается, если частота ν внешней силы совпадает с собственной частотой колебаний ν_0:

$$\nu = \nu_0.$$

Например, раскачивая качели (а качели — это физический маятник), мы действуем в такт ее собственным колебаниям. За счет работы мышц мы периодически сообщаем колебательной системе «качели» энергию. Если энергии, поступающей в систему, недостаточно для того, чтобы восполнить потери на трение, то амплитуда колебаний качелей будет уменьшаться до тех пор, *пока колебания не установятся. При установившихся колебаниях потери энергии системы равны энергии, которая поступает в систему* (в данном случае — в результате работы мышц).

Явление резонанса — явление резкого увеличения амплитуды вынужденных колебаний, если частота внешней силы совпадает с собственной частотой колебаний системы.

График зависимости амплитуды колебаний от частоты (или от частот) изменения внешней силы называют **резонансной кривой** (рис. 72). Чем больше в системе сила трения, тем меньше пик резонансной кривой, то есть тем слабее выражен резонанс.

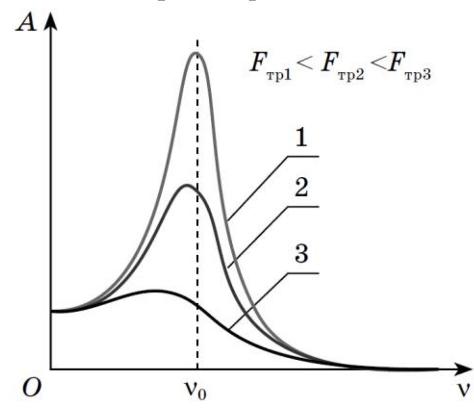


Рис. 72

§36 МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ. ЗВУК

Распространение в пространстве колебаний вещества или поля называют **волной.**

Механические волны — это процесс распространения колебаний в упругих средах.

Среду называют **упругой,** если при ее деформации возникают силы, препятствующие этой деформации, — силы упругости.

Механизм распространения волны

Тело, колеблющееся в упругой среде, — источник волны — действует на прилегающие к нему частицы и побуждает их делать вынужденные колебания. Эти частицы действуют на соседние, также побуждая их к колебаниям. Постепенно все частицы, одна за другой, приобщаются к колебательному движению — в среде распространяется волна.

Свойства волнового движения

1. *Волны распространяются в среде с конечной скоростью*: колебательное движение от одной точки среды к другой передается не мгновенно, а с некоторым опозданием.
2. *Источником механических волн всегда является колеблющееся тело*; поскольку колебания частиц среды при распространении волны вынужденные, то *частота колебаний каждой частицы равна частоте колебаний источника волны.*
3. *Механические волны не могут распространяться в вакууме.*
4. *Волновое движение не сопровождается переносом вещества* — частицы среды только колеблются около положений равновесия.
5. С приходом волны частицы среды начинают двигаться (приобретают кинетическую энергию). Это значит, что при распространении волны происходит перенос энергии. ***Перенос энергии без переноса вещества — важнейшее свойство любой волны.***

Любая частица среды, где распространяется волна, осуществляет периодические колебания во времени: *через определенный интервал времени T колебания частицы повторяются* (рис. 73). *Период T — характеристика периодичности волны во времени.*

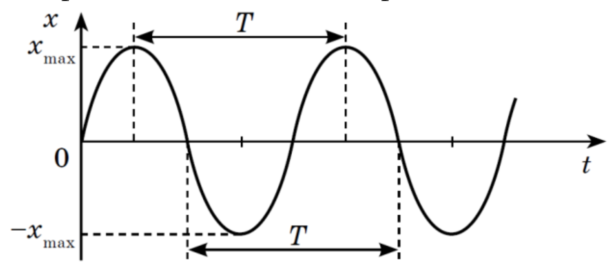


Рис. 73

Если зафиксировать определенный момент времени, то *через расстояние, равное длине λ волны, форма волны повторится* (рис. 74). Частицы, расположенные на расстоянии λ друг от друга, колеблются одинаково (синхронно). *Длина волны λ — характеристика периодичности волны в пространстве.*

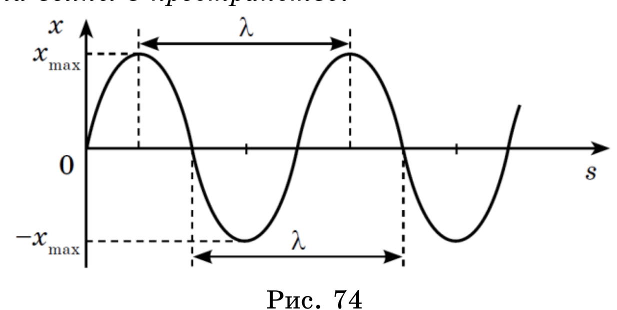


Рис. 74

Длина волны λ — расстояние между двумя ближайшими точками, которые колеблются одинаково; расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду T:

$$\lambda = vT, \text{ или } \lambda = \frac{v}{\nu}$$

Единица длины волны в СИ — **метр** (м).

Скорость распространения волны зависит от упругих свойств среды. Например, скорость распространения звуковой волны в воде гораздо больше, чем в воздухе: скорость звука в воздухе около 340 м/с, в воде — 1500 м/с, в металлах — 5000 м/с.

При переходе из одной среды в другую изменяется длина волны, а частота остается неизменной.

ВИДЫ ВОЛН[9]	
Поперечная волна — волна, в которой частицы среды колеблются перпендикулярно направлению распространения волны.	**Продольная волна** — волна, в которой частицы среды колеблются вдоль направления распространения волны.
	
В поперечной волне происходит последовательный *сдвиг* одних слоев среды относительно других. *Деформация сдвига* вызывает появление сил упругости только в твердых телах, поэтому *поперечные волны могут распространяться только в твердых телах.* Признак: наличие бугров и впадин.	*В продольной волне* происходит поочередное *сжатие* или *растяжение* среды. Такие деформации вызывают появление сил упругости в любой среде, поэтому *продольные волны могут распространяться во всех средах* (жидких, твердых, газообразных). Признак: наличие сгущений и разрежений частиц.

Звуковые (акустические) волны — это продольные механические волны, воспринимаемые органом слуха человека. Частота звуковой волны от 20 до 20000 Гц.

Волны частотой больше 20 000 Гц — это *ультразвуковые волны*, частотой меньше 20 Гц — *инфразвуковые волны*.

Скорость распространения звуковой волны зависит от вида среды и его температуры (с повышением температуры скорость распространения звука возрастает).

Любые волны, в том числе и звуковые:
- частично происходят на границе двух сред, при этом угол падения равен углу отражения (благодаря отражении звука возникает *эхо*)
- преломляются при переходе из одной среды в другую;
- огибают препятствия — *дифракция волн*;
- в результате наложения звуковых волн одинаковой частоты наблюдается усиление или ослабление звука в данной точке пространства — *интерференция волн.*

Характеристики звука

1. *Громкость*, которая зависит от амплитуды колебаний источника звука.
2. *Высота*, которая зависит от частоты: чем больше частота, тем выше тон.
3. *Тембр*, который зависит от набора частот и частот обертонов, из которых состоит звук.
4. *Акустический резонанс* — это явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний тела A (струны, столба воздуха и т. д.), если частота вынужденных колебаний ν, обусловленных звуковой волной, приближается к частоте собственных колебаний тела ν_0 или равна ей (рис. 75).

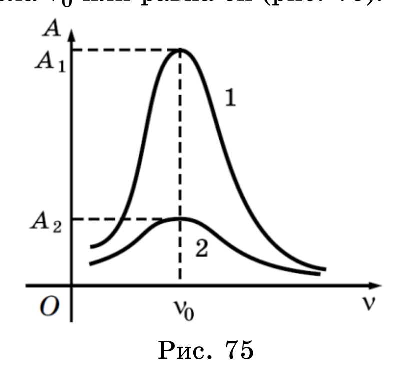


Рис. 75

9 Волны на поверхности воды не являются ни продольными, ни поперечными. Это *волны смешанного типа*. Частицы воды перемещаются как вдоль направления распространения волны, так и перпендикулярно ему. В общем случае частицы движутся по эллипсам.

ЭЛЕМЕНТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

§37 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОСТУЛАТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Специальная теория относительности (СТО) — современное учение о пространстве и времени. Специальная теория относительности (СТО) рассматривает взаимосвязь физических процессов в инерциальных СО, то есть в СО, которые движутся относительно друг друга равномерно прямолинейно.

Общая теория относительности (ОТО) рассматривает взаимосвязь физических процессов в неинерциальных СО, то есть в СО, которые ускоренно движутся относительно друг друга.

Релятивистские явления — явления, описанные СТО, но необъяснимые с точки зрения классической механики.

Пространство — форма существования материи, которая характеризует взаимоположение материальных объектов; имеет три измерения, однородная (все точки равноправны) и изотропная (все направления равноправны).

Время — форма существования материи, которая характеризует последовательность хода событий; имеет одно измерение, необратимая, однородная (все мгновения равноправны), изотропная (равноправный отсчет вперед и назад).

Событие — любое явление, происходящее в данной точке пространства в определенный момент времени. Событие для материальной точки считается заданной, если заданы координаты (x, y, z), определяющее место, где происходит событие, и время t, определяющее, когда событие происходит.

В релятивистской механике время зависит от выбора СО. События, произошедшие в одной СО одновременно, в другой СО могут быть разделены временным промежутком, то есть одновременность двух событий относительна.

Для инерциальных СО справедлив **механический принцип относительности (принцип относительности Галилея — Ньютона):** любые механические процессы во всех инерциальных СО происходят одинаково при одинаковых начальных условиях, то есть никакими механическими опытами внутри системы нельзя установить, движется система равномерно прямолинейно или покоится.

Постулаты СТО

I. *В инерциальных СО все законы природы одинаковы* (принцип относительности Эйнштейна). Это означает, что ни один физический опыт в любой физике не позволяет отличить одну инерциальную СО от другой;

II. *Скорость распространения света в вакууме одинакова во всех инерциальных СО*. Это означает, что скорость распространения света в вакууме *инвариантна* — она не зависит от скорости движения источника или приемника света. Неизменность скорости распространения света — фундаментальное свойство природы. Согласно данному постулату *скорость распространения света — максимально возможная скорость распространения любого взаимодействия*. Материальные объекты не могут иметь скорость бóльшую, чем скорость распространения света ($c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с).

Постулаты теории относительности независимо друг от друга сформулировали *Ж. А. Пуанкаре* и *А. Эйнштейн*.

§38 СЛЕДСТВИЯ ПОСТУЛАТОВ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Согласно второму постулату СТО скорость света в вакууме постоянна — она не зависит от скорости движения источника или приемника света. Это означает, что классический закон сложения скоростей в релятивистской механике применять нельзя. В СТО применяют *релятивистский закон сложения параллельных скоростей*.

Релятивистский закон сложения параллельных скоростей имеет вид:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}},$$

где v — скорость движения тела относительно неподвижной СО, v_1 — скорость движения тела относительно подвижной СО, v_2 — скорость подвижной СО относительно неподвижной, c — скорость света в вакууме.

При скоростях, которые намного меньше скорости света ($v_1 \ll c$ и $v_2 \ll c$) релятивистский закон сложения скоростей приобретает вид классического:

$$v = v_1 + v_2.$$

При скоростях, которые равны значению скорости света ($v_1 = c$ и $v_2 = c$) скорость движения тела относительно неподвижной СО будет равна скорости света ($v = c$) — в случае перехода от одной инерциальной СО в другую скорость распространения света не меняется.

Скорость распространения света в вакууме (c) — предельная скорость во Вселенной.

Длиной стержня называют расстояние между его концами, координаты которых зафиксированы *одновременно* (по часам той системы, в которой измеряется длина). Поскольку одновременность двух событий относительна, то и длина стержня будет разной в разных СО.

Лоренцево сокращение длины — уменьшение длины в направлении движения:

$$l = l_0\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

где l_0 — длина стержня в СО, относительно которой стержень покоится; l — длина стрежня в СО, относительно которой стержень движется.

При $v \ll c$ имеем $l = l_0$ — классическая механика.

Размеры тела уменьшаются только вдоль линии его движения: если стержень расположен вдоль линии своего движения, то его длина уменьшается, а вот диаметр остается неизменным. *Размеры тела в направлении, перпендикулярному направлению движения, не изменяются.*

Релятивистский эффект сокращения длины становится заметным только при движении тела со скоростью, сравнимой со скоростью света.

Релятивистское замедление времени — время в движущейся СО замедляется:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

где τ — интервал времени между двумя событиями в СО, в отношении которого тело движется со скоростью v,

τ_0 — интервал времени между двумя событиями в неподвижной (собственной) СО.

Замедление времени покажут *любые* часы в подвижной СО. *Эффект замедления времени* — свойство самого времени. В подвижной СО замедляются все физические процессы, замедляется и процесс старения.

Релятивистское замедление времени экспериментально подтверждено.

При $v \ll c$ имеем $\tau = \tau_0$ — классическая механика.

§39 РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ДИНАМИКА

Импульс тела, как и в классической механике, пропорционален скорости: $\vec{p} = m\vec{v}$, где m — масса тела в системе отсчета, относительно которой тело движется со скоростью v; m_0 — масса тела в неподвижной (собственной) системе отсчета:

$$\vec{p} = \frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Ни одна частица (тело) с массой m_0, отличной от нуля, не может двигаться со скоростью, равной или превышающей скорость распространения света в вакууме (только меньше c).

Второй закон Ньютона в импульсной форме такой же, как в классической механике:

$$\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p} = \frac{\Delta(m\vec{v})}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Один из важнейших результатов СТО — установление связи энергии E тела с его массой: если тело массой m_0 движется со скоростью v относительно некоторой СО, то энергия E тела в этой СО равна:

$$E = mc^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

где E — полная энергия тела (частицы) массой m_0, движущегося со скоростью v.

Гипотеза Эйнштейна: любое тело (любая частица), имеющее массу, несет с собой запас энергии:

$$E_0 = m_0c^2,$$

где E_0 — энергия покоя тела (собственная энергия тела) — это его внутренняя энергия; m_0 — масса покоя.

Массе покоя в 1 а. е. м. (атомную единицу массы) соответствует энергия 931,5 МэВ:

1 а. е. м. — 931 МэВ,

1 а. е. м. = $1{,}67 \cdot 10^{-27}$ кг,

1 эВ = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Передача неподвижноме телу энергии всегда сопровождается увеличением его массы, и наоборот: выделение телом энергии сопровождается уменьшением его массы. Например, если тело нагревают, его масса увеличивается, а когда охлаждают, его масса уменьшается. *Изменение энергии тела прямо пропорционально изменению его массы*:

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

В релятивистской физике энергия тела состоит из энергии покоя тела (частицы) и его кинетической энергии (в случаях, когда тело (частица) движется со скоростью намного меньшей, чем скорость света ($v \ll c$)):

$$E(v) = E_0 + E_k = m_0c^2 + \frac{m_0v^2}{2}$$

РАЗДЕЛ II. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

§40 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Молекулярная физика — раздел физики, в котором рассматриваются закономерности атомно-молекулярного строения макроскопических тел (систем).

Молекулярно-кинетическая теория (МКТ) — теория, рассматривающая строение вещества с точки зрения трех основных положений.

Основные положения молекулярно-кинетической теории (МКТ)

1. *Все вещества состоят из молекул или других структурных единиц (атомов, ионов и электронов), разделенных промежутками* (см. табл.). Свидетельством дискретного строения вещества являются фотографии, полученные с помощью ионного, электронного и туннельного микроскопов. О наличии промежутков между молекулами свидетельствует изменение объема твердых тел и жидкостей при изменении их температуры, диффузия.
2. *Частицы вещества пребывают в непрерывном беспорядочном (хаотическом) движении*; такое движение называют *тепловым* (рис. 76, *а*). Подтверждением этого положения являются явления диффузии, броуновского движения, осмоса.
3. Молекулы или атомы одновременно притягиваются и отталкиваются, а равнодействующая этих сил называется **силой межмолекулярного взаимодействия**. Силы молекулярного взаимодействия являются силами притяжения и отталкивания, зависят от расстояния между молекулами и преимущественно возникают вследствие взаимодействия электрических зарядов, которые входят в их состав. Эти силы являются *короткодействующими*.

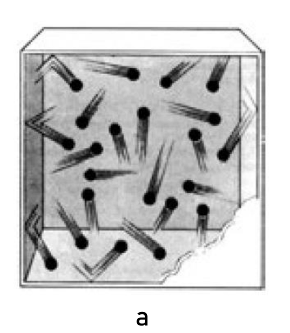
Основоположниками молекулярно-кинетической теории является *Демокрит* (V—IV вв. до н. э.), *М. В. Ломоносов* (XVIII в.).

МИКРОСТРУКТУРА		
Атомная	Молекулярная	Ионная

Броуновское движение — хаотическое движение видимых в микроскоп малых макрочастиц, взвешенных в жидкости или газе, которое происходит под действием ударов молекул (рис. 76, *б*).

Это явление названо в честь шотландского ботаника *Роберта Броуна* (1773–1858), который первым наблюдал его в 1827 г. Рассматривая в микроскоп взвешенные в воде частички пыльцы, Броун заметил, что они непрерывно движутся, постоянно изменяя скорость.

Причина броуновского движения — хаотическое движение молекул жидкости или газа. Двигаясь, молекулы среды непрерывно бомбардируют взвешенную в ней макрочастицу.



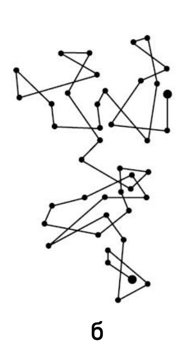


Рис. 76

Диффузия — процесс взаимного проникновения молекул одного вещества между молекулами другого, происходящий вследствие теплового движения молекул (рис. 77).

В любых средах скорость диффузии увеличивается с повышением температуры и давления.

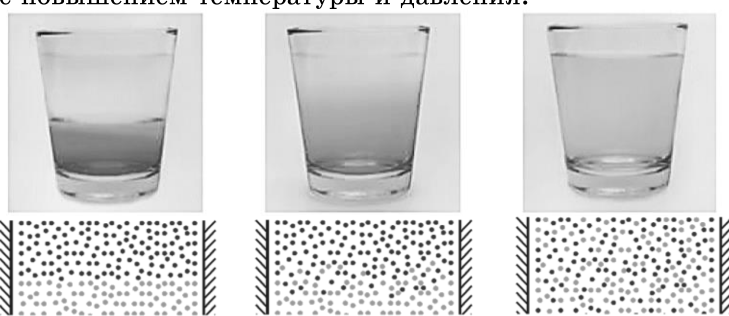


Рис. 77

Осмос (разновидность диффузии) — процесс односторонней диффузии растворителя сквозь полупроницаемую перегородку (мембрану) в сторону большей концентрации растворителя вещества. Например, если острым ножом отрезать дольку лимона, то сок практически не выделится; если посыпать дольку сахаром, то сок появится. Выделяясь из лимона, сок как бы стремится разбавить концентрированный раствор сахара, образовавшийся на срезе.

График зависимости силы молекулярного взаимодействия F от расстояния r между молекулами для простых молекул показан на рис. 78.

Сила межмолекулярного взаимодействия

F

Силы отталкивания

O d r

Силы притяжения

Рис. 78

Если расстояние r между молекулами меньше размеров d самих молекул ($r < d$), то преобладают силы отталкивания, поэтому молекулы отталкиваются друг от друга, если больше ($r > d$) — преобладают силы притяжения, поэтому молекулы притягиваются друг к другу. При расстоянии $r = d$ силы притяжения и силы отталкивания уравновешиваются (молекулы находятся в состоянии устойчивого равновесия).

В МКТ различают три фазовых (агрегатных) состояния[1] вещества: *жидкое, кристаллическое, газообразное*. Изменение фазового состояния называют *фазовым переходом*.

ФАЗОВЫЕ (АГРЕГАТНЫЕ) СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА		
Газообразное	**Жидкое**	**Твердое кристаллическое**
Молекулы газов расположены беспорядочно и на расстояниях, которые в десятки раз больше размеров самих молекул. На таких расстояниях молекулы практически не взаимодействуют друг с другом. *Газы не имеют формы и занимают весь предоставленный объем.* Большими расстояниями между молекулами объясняется и тот факт, что газы *легко сжимаются.*	*Молекулы жидкости в целом расположены хаотично, однако в расположении ближайших молекул сохраняется определенный (ближний) порядок.* Переходы молекул из одного равновесного состояния в другое происходят преимущественно в направлении внешней силы, поэтому *жидкости текучи: под действием внешних сил жидкость принимает форму того сосуда, в котором находится, при этом ее объем остается неизменным.*	В веществе, находящемся в твердом кристаллическом состоянии, *молекулы расположены в определенном порядке (образуют кристаллическую решетку) на расстояниях, примерно равных размерам самих молекул,* поэтому силы межмолекулярного взаимодействия удерживают их около положения равновесия. *Твердые тела сохраняют и объем, и форму; как и жидкость, их очень трудно сжать.*

§41 ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ В МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ

Атом — наименьшая частица химического элемента, являющаяся носителем его свойств, например H, Na, Cl, C, O.

Простейшие молекулы — это двух-, трехатомные молекулы, которые можно представить как шарик определенного диаметра.

Молекула — наименьшая частица вещества, обладающая его химическими свойствами и состоящая из атомов химических элементов. Она состоит из атомов одинаковых или различных химических элементов, например H_2, NaCl, $C_6H_{12}O_6$.

Совокупность молекул сохраняет физические свойства вещества.

Если атом (молекула) теряет один или несколько электронов, образуется **положительный ион**; если же к атому (молекуле) присоединились один или несколько электронов, образуется **отрицательный ион**.

Вещество — то, из чего состоит физическое тело.

Для измерения массы атома (молекулы) была принята *внесистемная единица* — **атомная единица массы** (а. е. м.), равная 1/12 массы атома Карбона $^{12}_{6}C$.

$$1 \text{ а. е. м.} = \frac{1}{12} m_0(^{12}_{6}C) \approx 1{,}66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

Относительная молекулярная (атомная) масса вещества M_r — отношение массы молекулы (атома) данного вещества к 1/12 массы атома изотопа Карбона $^{12}_{6}C$:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_0(^{12}_{6}C)},$$

где M_r — безразмерная величина.

Масса молекулы определяется с помощью периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева, где указаны относительные атомные массы веществ M_r.

Постоянная Авогадро (N_A) — число атомов или молекул в 1 моле любого вещества:

$$N_A \approx 6{,}02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

Один моль — количество вещества, в котором содержится столько же молекул или атомов, сколько атомов содержится в Карбоне $^{12}_{6}C$ массой 0,012 кг.

Закон Авогадро: 1 моль идеального газа при нормальных условиях (p_0 = 101 кПа, t = 0 °C) занимает объем $V_м = 22{,}4 \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$.

Количество вещества (количество молей) (ν) равно отношению числа молекул (N) в данном теле к постоянной Авогадро (N_A), то есть к числу молекул в 1 моле вещества:

$$\nu = \frac{N}{N_A}$$

Единица количества вещества в СИ — **моль.**

Молярная масса M — масса одного моля вещества:

$$M = m_0 N_A, \text{ или } M = M_r \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

Единица молярной массы в СИ — **килограмм на моль** (кг/моль).

Количество вещества массой m и молярной массой M можно определить по формуле:

$$\nu = \frac{m}{M}$$

Количество вещества объемом V и молярным объемом $V_м$ можно определить по формуле:

$$\nu = \frac{V}{V_м}$$

Масса молекулы m_0 (в кг) равна отношению молярной массы M к числу Авогадро N_A:

$$m_0 = \frac{M}{N_A}$$

Масса тела m (в кг) равна произведению массы молекулы m_0 и числа молекул N:

$$m = m_0 N$$

---

10 Существует и четвертое состояние — *плазма*, и оно самое распространенное во Вселенной, ведь именно в состоянии плазмы находится вещество в звездах.

§42 ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МКТ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Микроскопические параметры — физические величины, характеризующие свойства и поведение отдельной микрочастицы вещества.

Макроскопические параметры — физические величины, характеризующие свойства и поведение макроскопических тел без учета их молекулярного строения.

Основная задача МКТ — объяснить макроскопические свойства вещества с точки зрения его молекулярной структуры, то есть установить качественную и количественную взаимосвязь макро- и микроскопических параметров, характеризующих систему.

Идеальный газ — это физическая модель газа, молекулы которого принимают за материальный точки, не взаимодействующие друг с другом на расстоянии и упруго взаимодействующие в момент столкновения (рис. 79).

Потенциальная энергия взаимодействия молекул идеального газа равна нулю.

Реальные (разреженные) газы очень близки к идеальным.

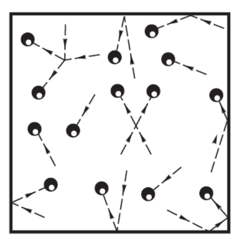


Рис. 79

Средний квадрат скорости $\bar{v}^2$ **движения молекул** равен среднему арифметическому квадратов скоростей молекул данной системы:

$$\bar{v}^2 = \frac{v_1^2 + v_2^2 + ... + v_N^2}{N},$$

где N — число молекул; v_1, v_2, ... v_N — скорости отдельных молекул.

Средняя квадратичная скорость $\bar{v}_{\text{кв}}$ **движения молекул** — это квадратный корень из среднего квадрата скорости:

$$\bar{v}_{\text{кв}} = \sqrt{\bar{v}^2}$$

Концентрация n — количество частиц в единице объема:

$$n = \frac{N}{V}$$

Единица концентрации в СИ — **метр в минус третьей степени** (м^{-3}).

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газа (уравнение Клаузиуса) связывает микропараметры (m_0, n, $\vec{v}$) и макропараметры (p, V, T):

$$p = \frac{1}{3}nm_0\bar{v}^2 = \frac{1}{3}\rho\bar{v}^2 = \frac{2}{3}n\bar{E}_k,$$

где p — давление газа, m_0 — масса молекулы, n — концентрация молекул, $\bar{v}$ — средняя квадратичная скорость движения молекул; ρ — плотность идеального газа; $\bar{E}_k = \frac{m_0\bar{v}^2}{2}$ — средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы.

§43 ТЕМПЕРАТУРА. ТЕМПЕРАТУРНАЯ ШКАЛА КЕЛЬВИНА

Нулевое начало термодинамики: любое макроскопическое тело или система тел при неизменных внешних условиях самопроизвольно переходит в термодинамическое равновесное состояние (состояние теплового равновесия), после достижения которого все части системы имеют одинаковую температуру.

Температура — физическая величина, характеризующая состояние теплового равновесия макроскопической системы. Во всех частях системы, находящейся в состоянии теплового равновесия, температура одинакова.

Состояние теплового равновесия — это такое состояние макроскопической системы, при котором все макроскопические параметры остаются неизменными сколь угодно долго.

Температуру измеряют *жидкостными* или *газовыми* **термометрами**, соответствующим образом градуированными. Высокую температуру измеряют *оптическими термометрами* (по спектру излучения) или *электрическими* (полупроводниковые термисторы, термопары).

Термометр фиксирует *собственную температуру*, равную температуре тела, с которым термометр находится в термодинамическом равновесии.

Термометрическое тело (основная часть термометра) не должно быть массивным, иначе оно существенно изменит температуру тела, с которым контактирует.

В температурной шкале Цельсия 0 °C принято температуру таяния льда при нормальном атмосферном давлении, 100 °C — температуру пара кипящей воды при нормальном атмосферном давлении. 1/100 этого интервала — это 1 °C (Цельсия). Обозначается t °C.

В термодинамической (абсолютной) шкале температур за нуль принята температура, при которой прекратилось бы тепловое движение частиц, из которых состоит тело. Эта температура называется **абсолютным нулем температур**.

Температуру T, измеренную по шкале Кельвина, называют **абсолютной температурой**.

Единица температуры по шкале Кельвина — **кельвин** (К): 1 К = 1 °C (рис. 80).



Рис. 80

Формула связи термодинамической температуры (T) и температуры (t) по шкале Цельсия:

$$T = (273 + t)\ \text{K}$$

Изменение температуры по шкале Кельвина равно изменению температуры по шкале Цельсия: $\Delta T = \Delta t$.

По шкале Цельсия абсолютный нуль соответствует температуре −273 °C (см. рис. 80).

В молекулярно-кинетической теории **температура** — это величина, обусловленная средней кинетической энергией поступательного движения частиц, из которых состоит система. *Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул идеального газа прямо пропорциональна абсолютной температуре**:

$$\overline{E}_k = \frac{3}{2}kT,$$

где $k \approx 1{,}38 \cdot 10^{-23}\ \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ — постоянная Больцмана.

Основное уравнение МКТ выражает зависимость давления газа p от концентрации молекул n и температуры T*:

$$p = nkT$$

Закон Авогадро: в равных объемах газов при одинаковых температурах и давления содержится одинаковое количество молекул:

$$N = \frac{pV}{kT}$$

Из определения кинетической энергии $\overline{E}_k = \frac{m_0\bar{v}^2}{2}$ и формулы связи кинетической энергии и температуры $\overline{E}_k = \frac{3}{2}kT$ получим формулу для расчета **средней квадратичной скорости** ($\bar{v}_{\text{кв}}$) поступательного движения молекул идеального газа*:

$$\frac{m_0\bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2}kT \Rightarrow \bar{v}^2 = \frac{3kT}{m_0}, \text{ то есть:}$$

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}},$$

где $R = kN_{\text{А}} \approx 8{,}31\ \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$ — **универсальная газовая постоянная.**

§44 ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева — Клапейрона), которое связывает макропараметры одного состояния газа:

$$pV = \frac{m}{M}RT, \text{ или } pV = \nu RT$$

Здесь p — давление газа; V — объем газа; m — масса газа; M — молярная масса газа; R — универсальная газовая постоянная; T — температура газа, поданная в кельвинах; ν — количество вещества (количество молей).

Уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона), которое связывает макроскопические состояния системы данной массы газа при переходе из состояния *1* в состояние *2*:

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2}, \text{ или } \frac{pV}{T} = \text{const}$$

Для данного газа некоторой массы отношение произведения давления на объем к температуре газа является неизменным.

Газовые законы определяют количественную зависимость между двумя параметрами данной массы газа при фиксированном значении третьего параметра.

Процесс, в ходе которого один из макроскопических параметров неизменной массы данного газа остается неизменным, называют **изопроцессом:**

1. **Изотермический процесс описывается законом Бойля — Мариотта:** для данной массы газа произведение давления газа на его объем является постоянным, если температура газа не меняется:
$$p_1V_1 = p_2V_2, \text{ или } pV = \text{const}.$$

Изотерма — график зависимости между параметрами данной массы газа при неизменной температуре (рис. 81).

Изотермический процесс проходит медленно, поскольку он обусловлен теплообменом с окружающей средой.

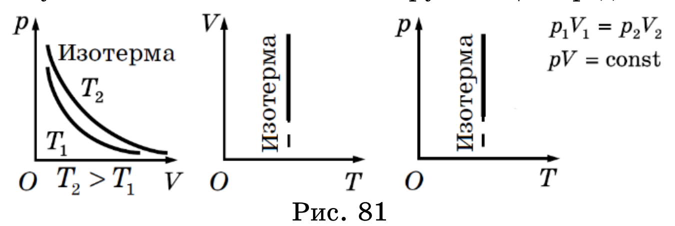


Рис. 81

2. **Изобарный процесс описывается законом Гей-Люссака:** для данной массы газа отношение объема и температуры является постоянным, если давление газа не меняется:
$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}, \text{ или } \frac{V}{T} = \text{const}.$$

Изобара — график зависимости между параметрами состояния данной массы газа при неизменном давлении (рис. 82).

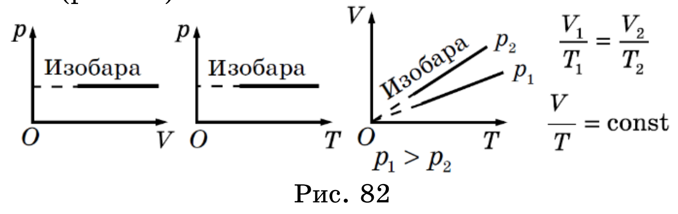


Рис. 82

3. **Изохорный процесс описывается законом Шарля:** для данной массы газа отношение давления газа к его температуре является постоянным, если объем газа не меняется:
$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}, \text{ или } \frac{p}{T} = \text{const}.$$

Изохора — график зависимости между параметрами состояния данной массы газа при неизменном объеме (рис. 83).

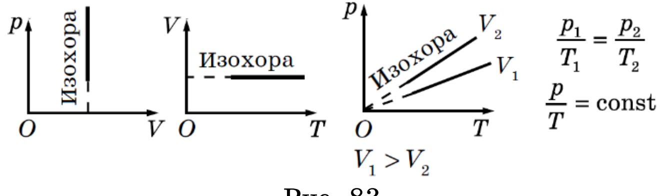


Рис. 83

Закон Дальтона: давление смеси газов, которые не взаимодействуют друг с другом химически, равно сумме парциальных давлений газов, из которых состоит смесь:
$$p = p_1 + p_2 + \ldots + p_n$$

Парциальное давление — это давление, которое создавал бы газ, если бы он занимал данный объем сам.

---

* В общем случае данные формулы имеют вид: $\overline{E}_k = \frac{i}{2}kT$, $p = \frac{i}{3}nkT$, $\bar{v} = \sqrt{\frac{ikT}{m_0}} = \sqrt{\frac{iRT}{M}}$, где i — количество степеней свободы ($i = 3$ для атомов; $i = 5$ для двухатомных молекул; $i = 6$ для молекул, состоящие из трех и более атомов). *Числом степеней свободы* называют число независимых величин, с помощью которых может быть задано положение тела или частицы.

СВОЙСТВА ПАРОВ, ЖИДКОСТЕЙ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ

§45 ПАРООБРАЗОВАНИЕ. ИСПАРЕНИЕ. КОНДЕНСАЦИЯ. НАСЫЩЕННЫЙ И НЕНАСЫЩЕННЫЙ ПАР. КИПЕНИЕ

Пар — это газообразное состояние вещества, в который могут переходить как жидкости (**испарение**) (рис. 84), так и твердые тела (**сублимация**, или **возгонка**).

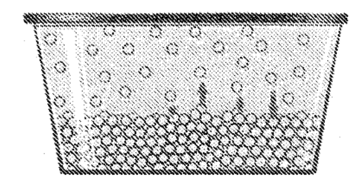


Рис. 84

Парообразование — переход вещества из жидкого состояния в газообразное. Существует два вида парообразования — испарение и кипение.

Испарение — процесс парообразования с поверхности жидкости.

Особенности испарения

1. *Испарение происходит при любой температуре*, поскольку в жидкости всегда присутствуют как медленно движущиеся молекулы, так и быстро движущиеся.
2. *Жидкость при испарении охлаждается*, поскольку ее покидают «быстрые» молекулы.
3. *Испарение сопровождается поглощением энергии*: чем меньше давление на свободную поверхность жидкости, тем больше скорость испарения.
4. *С увеличением температуры скорость испарения жидкости увеличивается.*
5. *При увеличении площади свободной поверхности жидкости скорость испарения увеличивается.*
6. *Скорость испарения зависит от рода жидкости*: чем слабее силы межмолекулярного взаимодействия жидкости, тем быстрее эта жидкость испаряется.
7. *Скорость испарения зависит от наличия ветра*: чем больше скорость движения воздуха над поверхностью жидкости, тем быстрее эта жидкость испаряется.

Конденсация — процесс перехода вещества из газообразного состояния в жидкое. При конденсации выделяется энергия.

Динамическим равновесием между паром и жидкостью называют такое состояние, при котором число молекул, которые вылетают из жидкости, равно числу молекул, которые возвращаются в жидкость, то есть *динамическое равновесие наступает тогда, когда скорость парообразования становится одинаковой со скоростью конденсации*.

Насыщенный пар — пар, находящийся в состоянии динамического (подвижного) равновесия со своей жидкостью (рис. 85, *а*). *Концентрация молекул насыщенного пара* — наибольшая возможная концентрация молекул пара при данной температуре.

Если испарение преобладает над конденсацией — **пар ненасыщенный** (рис. 85, *б*). У ненасыщенного пара концентрация молекул всегда меньше, чем у насыщенного при данной температуре.

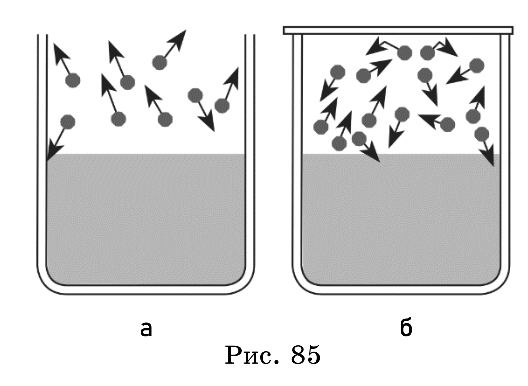


Рис. 85

Свойства насыщенного пара

1. *Давление насыщенного пара остается постоянным при изменении объема пара* (рис. 86, *а*). После полного испарения жидкости пар становится ненасыщенным и его давление уменьшается обратно пропорционально объему.
2. При увеличении температуры давление насыщенного пара увеличивается стремительнее сравнительно с идеальным газом (рис. 86, *б*). *С ростом температуры скорость испарения жидкости увеличивается*, следовательно, *увеличивается и концентрация молекул пара*. Одновременное увеличение концентрации молекул и температуры приводит к быстрому росту давления. Если повышение температуры приведет к полному испарению жидкости, то в дальнейшем пар станет ненасыщенным и его давление линейно будет зависеть от температуры.

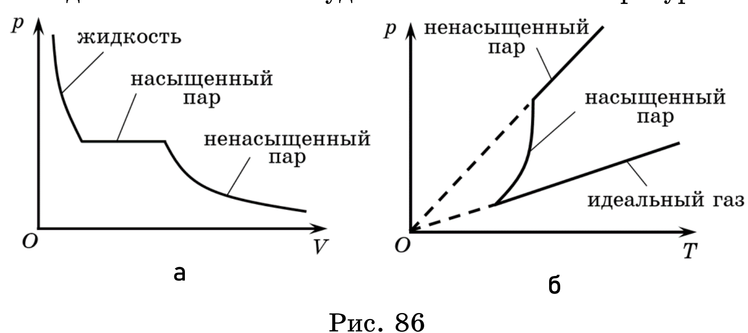


Рис. 86

Кипение — процесс парообразования, который происходит по всему объему жидкости и сопровождается образованием и ростом пузырьков пара (рис. 84; рис. 87).

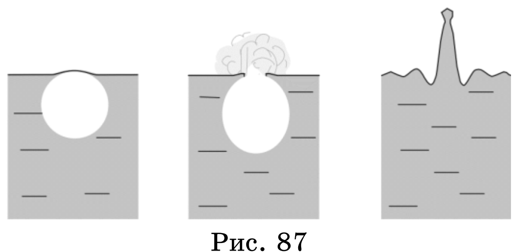


Рис. 87

Особенности кипения

1. *Процесс кипения происходит при определенной температуре.*
2. *Температура кипения жидкости зависит от рода жидкости и наличия растворенных в жидкости газов.*
3. *В процессе кипения температура жидкости не изменяется*, так как вся энергия идет на парообразование.
4. *Температура кипения зависит от внешнего давления*: чем меньше внешнее давление, тем меньше температура кипения. Кипение начинается при температуре, при которой давление насыщенного пара немного превышает внешнее давление.

5. *Каждое вещество при одинаковом внешнем давлении имеет свою температуру кипения*: чем меньше силы межмолекулярного притяжения в жидкости, тем ниже температура ее кипения.

Если из жидкости убрать растворенный воздух (многократным кипячением) и возможные центры парообразования (пылинки, ионы и т. д.), то можно нагреть жидкость до температуры несколько выше температуры кипения. Такое состояние называют **перегретой жидкостью**.

Перегретую жидкость можно получить при условии, если внешнее давление станет меньше по сравнению с давлением насыщенного пара при данной температуре.

Поскольку концентрация молекул насыщенного пара увеличивается с увеличением температуры ($T\uparrow \Rightarrow n\uparrow$), то с увеличением температуры увеличивается и плотность ($T\uparrow \Rightarrow \rho\uparrow$) насыщенного пара. С увеличением температуры плотность жидкости уменьшается, а плотность насыщенного пара, наоборот, увеличивается. При температуре $T_к$ (критическая температура) плотности станут одинаковыми, и разница между паром и жидкостью исчезнет (рис. 88).

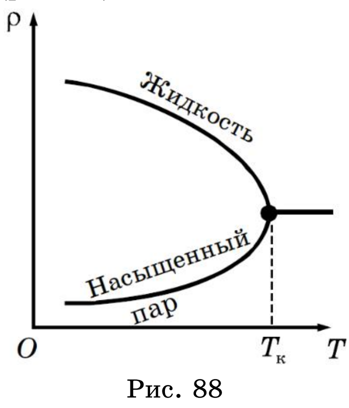


Рис. 88

Если газ имеет температуру выше, чем критическая, он при никаком давлении не сможет превратиться в жидкость.

§46 ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА. ТОЧКА РОСЫ

Влажность воздуха характеризует количество водяного пара в воздухе. Различают абсолютную и относительную влажность.

Абсолютная влажность $\rho_а$ — физическая величина, которая характеризует содержание водяного пара в воздухе и численно равна массе водяного пара, содержащего 1 м^3 воздуха:

$$\rho_а = \frac{m_{H_2O}}{V}$$

Абсолютная влажность — это парциальное давление водяного пара $p_а$, имеющееся в воздухе при данной температуре.

Из уравнения Менделеева — Клапейрона $pV = \frac{m}{M}RT$ следует, что абсолютная влажность и парциальное давление водяного пара связаны уравнением:

$$p_а = \frac{m_{H_2O}RT}{VM} = \frac{\rho_а RT}{M}$$

Единицы абсолютной влажности в СИ: $[p_а]$ = Па (паскаль), $[\rho_а]$ = кг/м^3 (килограмм на метр кубический).

Относительная влажность φ — физическая величина, которая показывает, насколько водяной пар близок к насыщению, и равна выраженному в процентах отношению абсолютной влажности (плотности водяного пара, содержащегося в воздухе) к плотности насыщенного пара при данной температуре:

$$\varphi = \frac{p_а}{p_{н.\,п}} \cdot 100\ \%, \text{ или } \varphi = \frac{\rho_а}{\rho_{н.\,п}} \cdot 100\ \%$$

Здесь $p_а$, или $\rho_а$, — абсолютная влажность воздуха, $p_{н.\,п}$ — давление насыщенного водяного пара при данной температуре, $\rho_{н.\,п}$ — его плотность.

Увеличить относительную влажность можно несколькими способами:

- сжать воздух при постоянной температуре;
- дополнительно испарить определенное количество воды;
- охладить воздух.

При охлаждении воздуха относительная влажность увеличивается и при определенной температуре $t_р$ достигает 100 % — пар становится насыщенным: появляется туман, выпадает роса.

Точка росы $t_р$ — температура, при которой водяной пар, находящийся в воздухе, становится насыщенным и начинается его конденсация.

Гигрометр — прибор для прямого измерения влажности воздуха.

Существует несколько видов гигрометров, но чаще используют *психрометрический* и *волостной*.

Действие психрометрического гигрометра (психрометра) (рис. 89, *а*) базируется на двух фактах:

1. Скорость испарения воды тем выше, чем ниже относительная влажность воздуха.
2. Вода при испарении охлаждается.

Психрометр состоит из двух термометров, один из которых увлажняется. По психрометрической таблице по показаниям сухого термометра и разницей температур сухого и влажного термометров определяют относительную влажность воздуха.

В волостном гигрометре (рис. 89, *б*) использовано свойство обезжиренного волоса удлиняться при увеличении влажности воздуха. В таких приборах есть волос *1*, ролик *2*, груз *3*, стрелка *4*.

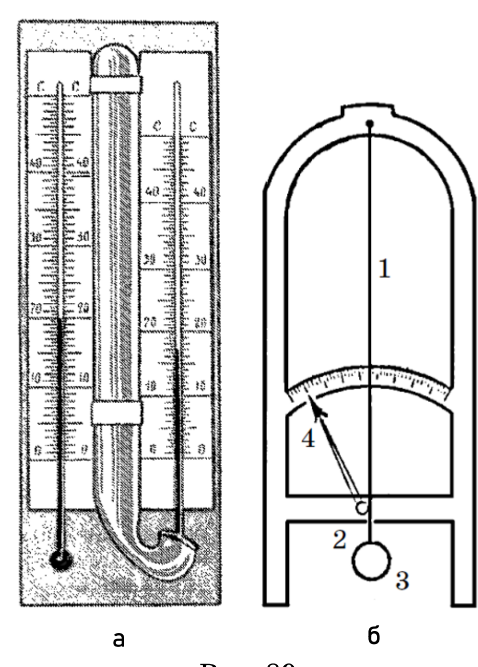


Рис. 89

ПСИХРОМЕТРИЧЕСКАЯ ТАБЛИЦА

Показания сухого термометра, °С	Разница показаний сухого и влажного термометров, °С										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Относительная влажность, %										
0	100	81	63	45	28	11	—	—	—	—	—
2	100	84	68	51	35	20	—	—	—	—	—
4	100	85	70	56	42	28	14	—	—	—	—
6	100	86	73	60	47	35	23	10	—	—	—
8	100	87	75	63	51	40	29	18	7	—	—
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	4	—
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	—
14	100	90	79	70	60	51	42	34	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

§47 ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ. СМАЧИВАНИЕ. КАПИЛЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Наиболее характерным свойством жидкого состояния является наличие резкой границы, разделяющей жидкость и ее пар.

Молекулы жидкости, находящиеся на ее поверхности, притягиваются молекулами, которые есть внутри жидкости. Притяжение молекул пара, которые содержатся над поверхностью, является ничтожно малым (рис. 90). Под влиянием равнодействующей силы F притяжения молекулы поверхностного слоя втягиваются внутрь жидкости, количество молекул на поверхности уменьшается, и свободная поверхность жидкости стремится уменьшить свою площадь (сократиться).

Это означает:

- Вдоль свободной поверхности жидкости действуют силы, которые пытаются сократить (взыскать) эту поверхность;
- Поверхностный слой жидкости имеет избыточную потенциальную энергию. Эта избыточная энергия является частью внутренней энергии жидкости и называется *поверхностной энергией* ($W_{пов}$).

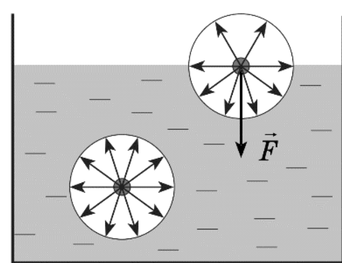


Рис. 90

Поверхностное натяжение жидкости — физическая величина, которая характеризует данную жидкость и равна отношению поверхностной энергии к площади поверхности жидкости:

$$\sigma = \frac{W_{пов}}{S}$$

Единица поверхностного натяжения жидкости в СИ — **ньютон на метр** (Н/м)

Поверхностное натяжение жидкости зависит:

- *от природы жидкости*: у летучих жидкостей (эфир, спирт, бензин) поверхностное натяжение меньше, чем у нелетучих (ртуть, жидкие металлы);
- *температуры жидкости*: чем выше температура жидкости, тем меньше поверхностное натяжение;
- *присутствия в составе жидкости поверхностно активных веществ* — их наличие уменьшает поверхностное натяжение;
- *свойств газа, с которым жидкость граничит.*

Вдоль поверхности жидкости действуют силы, которые пытаются стянуть эту поверхность (рис. 91). Эти силы называют *силами поверхностного натяжения*. Поверхность жидкости всегда «натянута» одинаково, то есть *силы поверхностного натяжения не зависят от площади поверхности жидкости*.

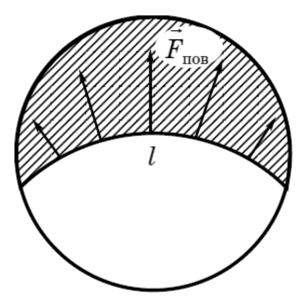


Рис. 91

Сила поверхностного натяжения $\vec{F}_{пов}$ — это сила, которая действует по касательной к свободной поверхности жидкости, перпендикулярно к линии, ограничивающей поверхность, и направлена в сторону сокращения этой поверхности:

$$F_{пов} = \sigma l,$$

где σ — поверхностное натяжение жидкости, l — длина линии, ограничивающей поверхность.

Если жидкость имеет две свободные поверхности, например мыльная пленка, то силы поверхностного натяжения действуют вдоль каждой поверхности.

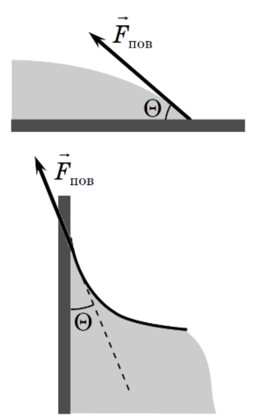
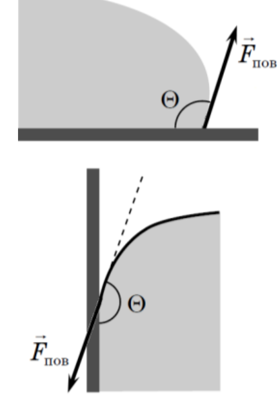
Если *тело находится на поверхности жидкости*, то сила поверхностного натяжения направлена:

- вертикально вниз, если жидкость смачивает тело;
- вертикально вверх, если жидкость не смачивает тело.

Работа по изменению площади свободной поверхности жидкости равна изменению поверхностной энергии:

$$A = \Delta W_{пов} = \sigma \Delta S$$

При контакте жидкости и твердого тела свободная поверхность жидкости искривляется. *Форма свободной поверхности жидкости зависит от сил взаимодействия молекул жидкости с молекулами твердого тела*.

Смачивание	Несмачивание
Если силы взаимодействия между молекулами жидкости меньше сил взаимодействия между молекулами жидкости и твердого тела, жидкость *смачивает* поверхность твердого тела.	Если силы взаимодействия между молекулами жидкости больше, чем силы взаимодействия между молекулами жидкости и твердого тела, жидкость *не смачивает* поверхность твердого тела.
	
Капля жидкости, которая смачивает, стремится растянуться поверхностью твердого тела, краевой угол[11] $\Theta < 90°$ (при полном смачивании $\Theta = 0°$), а поверхность жидкости вблизи стенки сосуда является вогнутой и поднимается выше уровня жидкости в сосуде.	Капля жидкости, которая не смачивает, приобретает форму, близкую к сферической, краевой угол $\Theta \geqslant 90°$ (при полном несмачивании $\Theta = 180°$), а поверхность жидкости вблизи стенки сосуда является выпуклой и опускается ниже уровня жидкости в сосуде.

Капиллярные явления — явления опускания (в случае несмачивания) и поднятия (в случае смачивания) жидкости узкими трубками (капиллярами).

Искаженная поверхность жидкости в капиллярах имеет сферическую форму и называется **мениском**.

Под искривленной поверхностью жидкости в капиллярах возникает избыточное (отрицательное или положительное) давление, которое называют **лапласовым**:

$$p_{изб} = \frac{2\sigma}{R},$$

где σ — поверхностное натяжение жидкости, R — радиус капилляра (рис. 92).

[11] *Краевой угол (угол смачивания)* Θ — это угол, образованный плоской поверхностью твердого тела и плоскостью, касательная к поверхности жидкости, которая граничит с твердым телом.

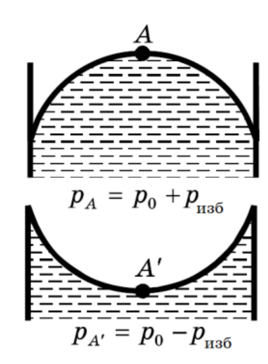


Рис. 92

Если жидкость *смачивает* капилляр, то сила лапласового давления направлена вверх, и жидкость поднимается по капилляру (рис. 93, *а*).

Если жидкость *не смачивает* капилляр, то сила лапласового давления направлена вниз, и жидкость опускается по капилляру (рис. 93, *б*).

Жидкость подниматься (опускается) до тех пор, пока сила тяжести не будет уравновешена силой поверхностного натяжения: $mg = F_{пов}$.

При *полном смачивании (несмачивании)* **высота** поднятия (опускания) жидкости в капилляре определяется по формуле*:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R}$$

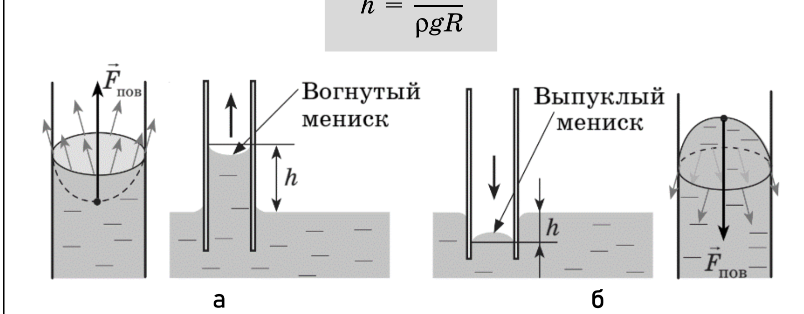


Рис. 93

§48 МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Механическое напряжение σ — физическая величина, которая характеризует деформированное тело и равна отношению модуля силы упругости $F_{упр}$ к площади S поперечного сечения тела (рис. 94):

$$\sigma = \frac{F_{упр}}{S}$$

Единица механического напряжения в СИ — **паскаль** (Па).

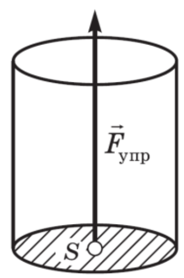


Рис. 94

* Если смачивание неполное, то $h = \frac{2\sigma}{\rho g R} \cdot \cos\Theta$, где Θ — краевой угол.

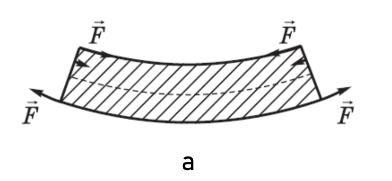
Относительное удлинение ε **тела** — физическая величина, равная отношению удлинения Δl к исходной длине l_0 тела:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \text{ или в процентах: } \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\ \%$$

Если $\varepsilon > 0$, то это деформация растяжения, если $\varepsilon < 0$ — деформация сжатия.

Деформация изгиба и кручения (рис. 95, *а*).

Деформация сдвига (рис. 95, *б*).



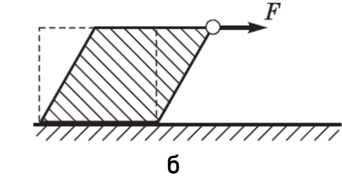


Рис. 95

Закон Гука: при *малых* упругих деформациях растяжения и сжатия механическое напряжение σ прямо пропорционально относительному удлинению ε:

$$\sigma = E|\varepsilon|,$$

где E — модуль Юнга (модуль упругости). Модуль Юнга характеризует упругие свойства материала.

Единица модуля Юнга в СИ — **паскаль** (Па).

Потенциальная энергия деформированного тела:

$$E_p = \frac{k\Delta l^2}{2},$$

где $k = \frac{ES}{l_0}$ — жесткость тела; Δl — удлинение.

Диаграмма растяжения — экспериментально полученный график зависимости механического напряжения σ от относительного удлинения ε (рис. 96).

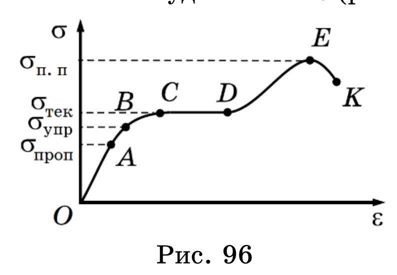


Рис. 96

Участок OA: деформация упругая. При малых деформациях напряжение прямо пропорционально относительному удлинению. Выполняется **закон Гука:** $\sigma = E|\varepsilon|$, где E — модуль Юнга.

Максимальное напряжение, при котором еще выполняется закон Гука, называется **пределом пропорциональности**: $\sigma_{\text{проп}}$.

Участок AB: закон Гука не выполняется, но деформация упругая. Максимальное напряжение, при котором еще не возникает заметная остаточная деформация, называется **пределом упругости** $\sigma_{\text{упр}}$.

Участок BC: пластическая деформация.

Участок CD: участок текучести материала. Удлинение происходит практически без увеличения нагрузки.

Участок DE: укрепление материала. Удлинение происходит при значительном увеличении нагрузки.

При достижении максимального значения механического напряжения $\sigma_{\text{п. п}}$ (**предел прочности**) материал растягивается без увеличения внешней нагрузки до самого разрушения в точке K.

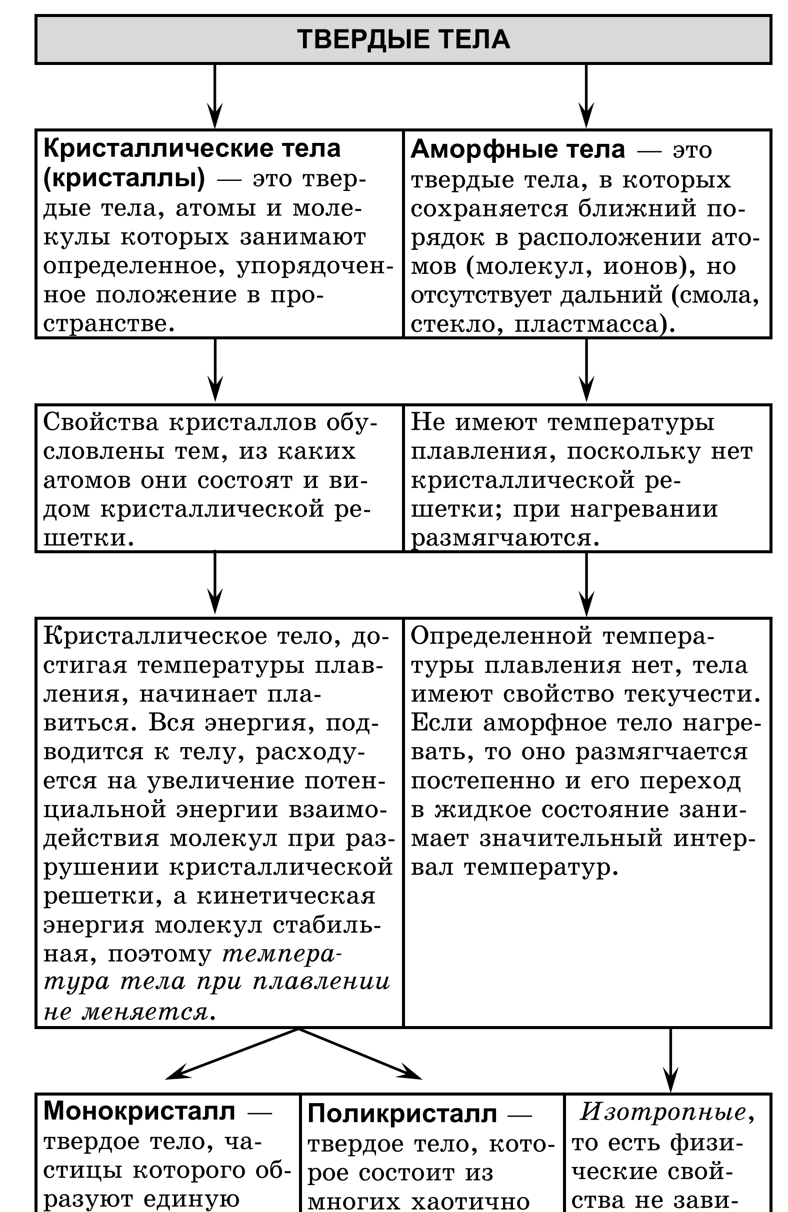
Запас прочности n равен отношению предела прочности $\sigma_{\text{п. п}}$ к допустимому механическому напряжению $\sigma_{\text{доп}}$:

$$n = \frac{\sigma_{\text{п. п}}}{\sigma_{\text{доп}}}$$

Материалы, в которых незначительные нагрузки вызывают пластическую деформацию, называют **пластическими** (например, свинец, смола).

Материалы, которые проявляют свойства упругости при значительной деформации, называют **упругими** (например, резина, сталь).

Различают *кристаллические* и *аморфные твердые тела*.



Жидкий кристалл — вещества в состоянии, промежуточном между твердым кристаллическим и изотропным жидким. Сохраняя основные особенности жидкости, например текучесть, они имеют характерное свойство твердых кристаллов — анизотропию физических свойств.

§49 ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ И СПОСОБЫ ЕЕ ИЗМЕНЕНИЯ

Термодинамика — раздел физики, изучающий общие свойства макроскопических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия. Термодинамика изучает наиболее общие закономерности преобразования энергии, но не рассматривает молекулярного строения вещества.

Любая система, состоящая из большого количества частиц — атомов, молекул, ионов и электронов, осуществляющих хаотическое тепловое движение и при взаимодействии между собой обменивающихся энергией, называют **термодинамической системой**. Такими системами являются газы, жидкости и твердые тела (их еще называют макроскопическими телами).

Состояние термодинамической системы обусловлено температурой, объемом, давлением и другими термодинамическими параметрами.

Внутренняя энергия в термодинамике определяется как сумма кинетических энергий хаотического (теплового) движения частиц вещества (атомов, молекул, ионов), из которых состоит тело, и потенциальных энергий их взаимодействия.

Единица внутренней энергии в СИ — **джоуль** (Дж).

Особенности внутренней энергии идеального газа

1. Атомы и молекулы идеального газа практически не взаимодействуют друг с другом, поэтому *внутренняя энергия идеального газа равна кинетической энергии поступательного и вращательного движений его частиц*.
2. *Внутренняя энергия данной массы идеального газа прямо пропорциональна его абсолютной температуре.*

$$U = \bar{E}_k N = \frac{3}{2}kT \cdot \frac{m}{M}N_A = \frac{3}{2}\frac{m}{M}kN_AT, \text{ то есть:}$$

$$U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}RT^*$$

Используя уравнение Менделеева — Клапейрона $pV = \frac{m}{M}RT$, выражение для внутренней энергии идеального одноатомного газа можно представить так:

$$U = \frac{3}{2}pV^*$$

3. *Внутренняя энергия — функция состояния системы*, то есть она однозначно определяется основными макроскопическими параметрами (p, V, T), характеризующими систему. Независимо от того, каким образом система переведена из одного состояния в другое, изменение внутренней энергии будет одинаковым.
4. Изменение внутренней энергии идеального одноатомного газа вычисляется по формулам:

$$\Delta U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}R\Delta T = \frac{3}{2}\Delta(pV)$$

5. *Внутреннюю энергию можно изменить двумя способами: совершением работы и теплопередачей.*

Теплопередача (теплообмен) — процесс изменения внутренней энергии тела или частей тела без совершения работы (рис. 97).

Самопроизвольно тепло всегда передается от более нагретого тела к менее нагретому.

ВИДЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ		
Теплопроводность	**Конвекция**	**Излучение**
Вид теплопередачи, который обусловлен хаотическим движением частиц вещества и не сопровождается переносом этого вещества. Лучшие проводники тепла — металлы, плохо проводят тепло дерево, стекло, кожа, жидкости (за исключением жидких металлов); самые плохие проводники тепла — газы. Передача энергии от горячей воды к батарее отопления, от поверхности воды до ее нижних слоев и т. д. происходит благодаря теплопроводности.	*Вид теплопередачи, при котором тепло переносится потоками жидкости или газа.* Теплые потоки жидкости или газа имеют меньшую плотность, поэтому под действием архимедовой силы поднимаются, а холодные потоки — опускаются. Благодаря конвекции происходит циркуляция воздуха в помещении, нагревается жидкость в стоящей на плите кастрюле, существуют ветры и морские течения и т. д. *В твердых телах конвекция невозможна.*	*Вид теплопередачи, при котором энергия передается посредством электромагнитных волн.* Излучение — универсальный вид теплопередачи: тела всегда излучают и поглощают инфракрасное (тепловое) излучение. *Это единственный вид теплообмена, возможный в вакууме* (энергия от Солнца передается только излучением). *Лучше излучают и поглощают энергию тела с темной поверхностью.*

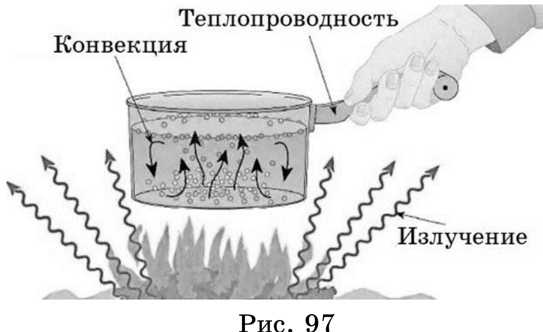


Рис. 97

§50 КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ

Количество теплоты Q — это физическая величина, равная энергии, которую тело получает (или отдает) в ходе теплопередачи.

Количество теплоты, которое поглощается при нагревании вещества (или выделяется при его охлаждении), вычисляют по формуле:

$$Q = cm\Delta t = cm\Delta T:$$

- при нагревании: $Q = cm(t - t_0)$;
- при охлаждении: $Q = cm(t_0 - t)$,

где c — удельная теплоемкость вещества; m — масса вещества; $\Delta t = \Delta T$ — изменение температуры; t и t_0 — соответственно начальная и конечная температура.

Единица количества теплоты в СИ — **джоуль** (Дж).

* В общем случае внутренняя энергия рассчитывается по формуле $U = \frac{i}{2}\frac{m}{M}RT = \frac{i}{2}pV$, где i — количество степеней свободы.

Удельная теплоемкость вещества c — это физическая величина, характеризующая данное вещество и численно равная количеству теплоты, которое необходимо передать веществу массой 1 кг, чтобы нагреть его на 1 К (1 °С).

Единица удельной теплоемкости в СИ — джоуль на килограмм-кельвин (Дж/(кг · К)) или джоуль на килограмм-градус Цельсия (Дж/(кг · °С)).

Удельная теплоемкость вещества зависит от вида вещества, его агрегатного состояния и интервала температур, в котором проходит теплопередача.

Произведение удельной теплоемкости на массу вещества, из которого изготовлено тело, называют **теплоемкостью тела**:

$$C = cm$$

Жидкие и твердые вещества расширяются при нагревании незначительно, их удельные теплоемкости при постоянном объеме и постоянном давлении остаются постоянными*.

Для калориметрических измерений используется прибор — **калориметр**. Простейший калориметр (рис. 98) представляет собой сосуд с крышкой. Сосуд ставят на пробковую подставку, помещенный в другой, больший, сосуд, так, что между ними остается слой воздуха, который является теплоизолятором.

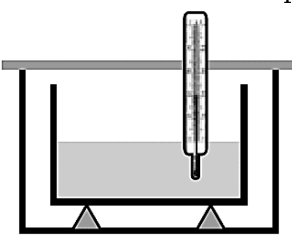


Рис. 98

Уравнение теплового баланса: если внутренняя энергия тел, составляющих изолированную систему, изменяется только в результате теплопередачи между этими телами, то суммарное количество теплоты, отданное более нагретыми телами систему, равно суммарному количеству теплоты, полученному менее нагретыми телами этой системы:

$$Q_1^- + Q_2^- + ... + Q_n^- = Q_1^+ + Q_2^+ + ... + Q_k^+,$$

где n — количество тел, отдающих энергию; k — количество тел, получающих энергию.

Изменение агрегатного состояния (рис. 99)

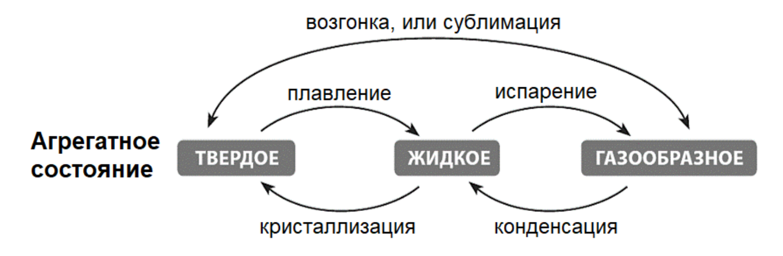


Рис. 99

* Если нагревать газ при постоянном объеме, его теплоемкость (C_v) и удельную теплоемкость (c_v) можно вычислить по формулам: $C_v = \frac{iR}{2}$, $c_v = \frac{C_v}{M} = \frac{iR}{2M}$, где M — молярная масса вещества. Если нагревать газ при постоянном давлении, его теплоемкость (C_p) и удельную теплоемкость (c_p) можно определить по формулам: $C_p = C_v + R = \frac{(i+2)R}{2}$, $c_p = \frac{C_p}{M} = \frac{(i+2)R}{2M}$.

1. Процесс превращения твердого кристаллического тела в жидкость называют **плавлением**; процесс превращения жидкости в твердое кристаллическое тело — **кристаллизацией**.

Количество теплоты Q, которое поглощается при плавлении кристаллического вещества (или выделяется при его кристаллизации), вычисляют по формуле:

$$Q = \pm\lambda m,$$

где λ — удельная теплота плавления (кристаллизации). Знак «+» выбирают, когда $Q > 0$ (при плавлении), знак «−» выбирают, когда $Q < 0$ (при кристаллизации).

В процессе плавления и кристаллизации температура вещества не изменяется.

При кристаллизации вещества выделяется такое же количество теплоты, которое было потрачено на его плавление (см. рис. 100).

Температура плавления зависит от рода вещества и внешнего давления.

Для большинства фазовых переходов «кристалл ↔ жидкость» плотность вещества в жидком состоянии меньше, чем в кристаллическом. Исключение составляют лед и чугун.

2. Фазовые переходы «жидкость ↔ пар» происходят при любой температуре.

Количество теплоты Q, которое поглощается при парообразовании (или выделяется при конденсации), вычисляют по формуле:

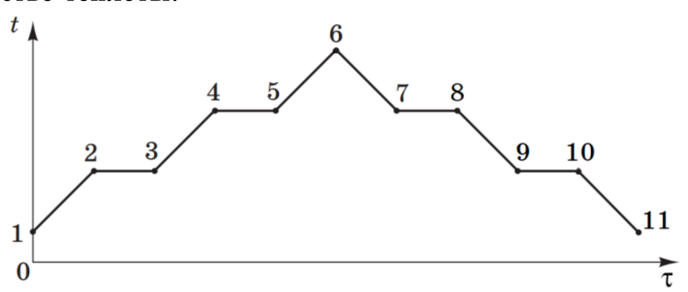
$$Q = \pm Lm,$$

где L — удельная теплота парообразования (конденсации)[12]. Знак «+» выбирают, когда $Q > 0$ (при парообразовании), знак «−» выбирают, когда $Q < 0$ (при конденсации).

Единица удельной теплоты плавления и парообразования в СИ — **джоуль на килограмм** (Дж/кг).

При конденсации пара в жидкость выделяется такое же количество теплоты, которое было потрачено на испарение жидкости (см. рис. 100).

Внутренняя энергия тела изменяется при нагревании или охлаждении, парообразовании или конденсации, плавлении или кристаллизации. Во всех случаях телу передается или от него отнимается некоторое количество теплоты.



$Q_{1-2} = cm(t_2 - t_1)$ — нагревание вещества
$Q_{2-3} = \lambda m$ — плавление вещества
$Q_{3-4} = cm(t_4 - t_3)$ — нагревание жидкости
$Q_{4-5} = Lm$ — парообразование во время кипения
$Q_{5-6} = cm(t_6 - t_5)$ — нагревание пара
$Q_{6-7} = cm(t_6 - t_7)$ — охлаждение пара
$Q_{7-8} = -Lm$ — конденсация
$Q_{8-9} = cm(t_8 - t_9)$ — охлаждение жидкости
$Q_{9-10} = -\lambda m$ — кристаллизация вещества
$Q_{10-11} = cm(t_{10} - t_{11})$ — охлаждение вещества

Рис. 100

[12] Для обозначения удельной теплоты парообразования используют также символ r.

Химическая реакция горения топлива происходит с выделением теплоты.

Количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании топлива, вычисляют по формуле:

$$Q = qm,$$

где q — удельная теплота сгорания топлива; m — масса топлива.

Единица удельной теплоты сгорания топлива в СИ — **джоуль на килограмм** (Дж/кг).

Топливо бывает *твердым* (каменный уголь, торф, дрова, сухое горючее), *жидким* (нефть, керосин, бензин, дизельное топливо) и *газообразным* (природный газ, пропан, бутан).

Устройства, в которых происходит сгорание топлива, называют **нагревателями**. Это печи, топки и горелки различной конструкции или камеры сгорания в тепловых машинах.

Коэффициент полезного действия нагревателя η — физическая величина, характеризующая эффективность нагревателя и равная отношению полезно использованной теплоты ко всей теплоте, которая может быть выделена в процессе полного сгорания топлива:

$$\eta = \frac{Q_п}{Q_з} \cdot 100\ \%$$

§51 ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ РАБОТА

Термодинамическая работа выполняется телами при *изменении их объема*.

Геометрический смысл работы газа: работа газа численно равна площади фигуры, ограниченной графиком зависимости p от V, осью V и изохорами, которые соответствуют объему газа в начальном и конечном состояниях (рис. 101, *а*, *б*).

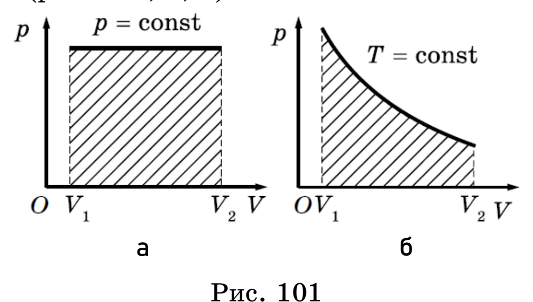


Рис. 101

Если объем газа увеличивается ($V_2 > V_1$), то работа газа положительная ($A > 0$); если объем газа уменьшается ($V_2 < V_1$) — отрицательная ($A < 0$).

Во время замкнутого цикла работа газа A численно равна площади фигуры, ограниченной графиком цикла (рис. 102). КПД цикла η определяется по формуле:

$$\eta = \frac{A}{Q_{получ}} \cdot 100\ \%$$

Здесь $Q_{получ}$ — количество теплоты, которое газ получал в ходе процесса. Например, во время цикла, график которого изображен на рис. 102, на участках *1—2* и *2—3* газ получал определенное количество теплоты, а на участках *3—4* и *4—1* — отдавал, поэтому в этом случае $Q_{получ} = Q_{1-2} + Q_{2-3}$.

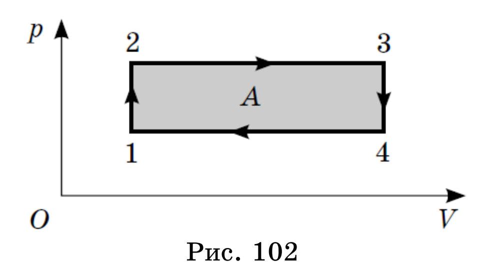


Рис. 102

Работа газа в ходе изопроцессов

1. Работа газа в ходе изобарного процесса (рис. 103): $A = Fs\cos\alpha = pS\Delta l\cos 0°$, то есть:

$$A = p\Delta V$$

Изобарное расширение газа (рис. 103, *а*).
Изобарное сжатие газа (рис. 103, *б*).

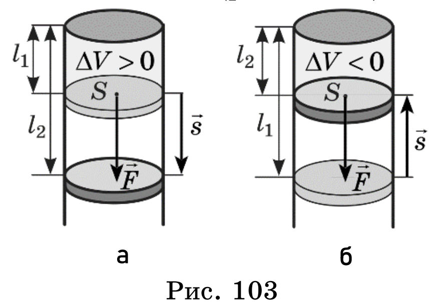


Рис. 103

Используя уравнение Менделеева — Клапейрона $pV = \frac{m}{M}RT$, работа в ходе изобарного процесса:

$$A = \frac{m}{M}R\Delta T$$

2. Работа газа в ходе изотермического процесса определяется как площадь фигуры под графиком изотермы (см. рис. 101, *б*)*.
3. В ходе изохорного процесса газ работу не выполняет ($A = 0$).

Если над газом внешние силы выполняют определенную работу A', то работа газа равна работе внешних сил, взятую с противоположным знаком:

$$A = -A'$$

§52 ЗАКОНЫ ТЕРМОДИНАМИКИ. АДИАБАТНЫЙ ПРОЦЕСС

Закон сохранения и превращения энергии, распространенный на тепловые явления, называют **первым законом термодинамики**: изменение внутренней энергии ΔU при переходе из одного состояния в другое равно сумме работы A' внешних сил и количества теплоты Q, сообщенного системе или переданного системой окружающим телам в процессе теплообмена:

$$\Delta U = A' + Q$$

* Для нахождения площади фигуры под графиком изотермы используют интеграл и получают формулу:

$$A = \frac{m}{M}RT\ln\frac{V_2}{V_1}.$$

Согласно закону Бойля — Мариотта $p_1V_1 = p_2V_2$, или $\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2}$, работа в изотермическом процессе:

$$A = \frac{m}{M}RT\ln\frac{p_1}{p_2}.$$

Если система получает некоторое количество теплоты, то в приведенной формуле Q берется со знаком «+»; если отдает, то Q берется со знаком «−».

Если система сама выполняет работу A, то (так как $A' = -A$) **первый закон термодинамики** удобно формулировать так: количество теплоты Q, переданное системе, идет на изменение внутренней энергии системы ΔU и на совершение системой работы A против внешних сил:

$$Q = \Delta U + A$$

Первый закон термодинамики в изопроцессах

1. ***Изотермический процесс***. В ходе изотермического процесса температура, а значит, и внутренняя энергия газа не изменяются ($\Delta U = 0$), поэтому уравнение первого закона термодинамики имеет вид:
$$Q = A.$$
При изотермическом процессе все переданное газу количество теплоты идет на совершение механической работы.
2. ***Изобарный процесс***. В ходе изобарного процесса совершается работа и изменяется внутренняя энергия газа, поэтому уравнение первого закона термодинамики имеет вид:
$$Q = \Delta U + A.$$
При изобарном процессе переданное газу количество теплоты идет и на увеличение внутренней энергии газа, и на совершение механической работы.
3. ***Изохорный процесс***. В ходе изохорного процесса объем газа не изменяется ($\Delta V = 0$) и газ работу не совершает ($A = 0$), поэтому уравнение первого закона термодинамики имеет вид:
$$Q = \Delta U.$$
При изохорном процессе все переданное газу количество теплоты расходуется на увеличение внутренней энергии газа.

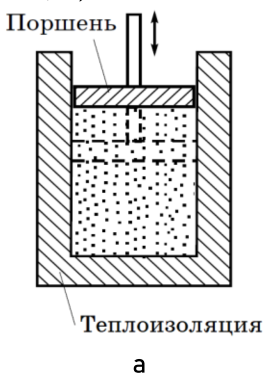
Адиабатный процесс — процесс, который происходит без теплообмена с окружающей средой; процесс в теплоизолированной системе (рис. 103, *а*):
$$Q = 0.$$

При адиабатном процессе количество теплоты Q, переданное системе, равно нулю, поэтому первый закон термодинамики имеет вид:
$$\Delta U + A = 0, \text{ или } \Delta U = -A, \text{ или } \Delta U = A'.$$

В процессе адиабатного расширения газ совершает положительную работу за счет уменьшения своей внутренней энергии, при этом температура газа уменьшается; в процессе адиабатного сжатия газ совершает отрицательную работу, и в результате внутренняя энергия и температура газа увеличиваются.

Поскольку идеальной теплоизолирующей системы в природе быть не может, то адиабатный процесс в реальных условиях может быть только быстротекущим: $Q \to 0$.

График адиабатного процесса в координатах p, V (рис. 104, *б*).



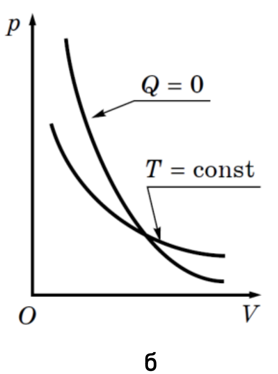


Рис. 104

Адиабата ($Q = 0$) размещается более круто, чем изотерма ($T = \text{const}$). Это объясняется тем, что при адиабатическом сжатии увеличение давления газа обусловлено не только увеличением концентрации, как при изотермическом сжатии, но и повышением температуры.

Процессы, которые могут самопроизвольно происходить в одном направлении, называют **необратимыми процессами**.

Необратимость процессов в природе отображает **второй закон термодинамики**, который имеет несколько эквивалентных формулировок:

1. Невозможно осуществить такой периодический процесс, единственным результатом которого было бы полное превращение в работу теплоты, получаемой от нагревателя (формулировка Кельвина).
2. Невозможен процесс, единственным результатом которого является передача энергии в форме теплоты от менее нагретого тела к более нагретому (формулировка Клаузиуса).
3. Вечный двигатель второго рода невозможен, то есть двигатель, КПД которого при преобразовании теплоты в работу равен 100 % (формулировка Карно).

Упорядоченное движение может переходить в неупорядоченное спонтанно (естественный процесс) — это, например, преобразование механической энергии в тепловую. Обратный процесс спонтанно происходить не может (необратимый процесс), но он возможен при условии выполнения работы внешними силами.

§53 ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Тепловой двигатель — тепловая машина циклического действия, которая энергию, выделяющуюся при сгорании топлива, преобразует в механическую работу.

Тепловой двигатель должен работать циклически; после расширения газа наступает сжатие.

Три основные части теплового двигателя (рис. 105, *а*)

- нагреватель (T_1) — источник внутренней энергии;
- рабочее тело (газ или пар), выполняющий механическую работу за счет внутренней энергии, полученной от нагревателя;
- холодильник ($T_1 > T_2$), обеспечивающий естественный процесс передачи тепла от более нагретого тела к более холодному, чем осуществляет компенсацию процесса преобразования тепловой энергии в механическую. Холодильником может быть окружающая среда (так охлаждается радиатор бытового кондиционера, радиатор двигателя внутреннего сгорания).

Цикл Карно — схема идеальной тепловой машины (с высоким КПД).

Работа газа, которая осуществляется, полностью происходит за счет количества теплоты, отданной нагревателем. При сжатии газа работа внешних сил полностью превращается в теплоту, которая отдается холодильнику (рис. 105, *б*).

Коэффициент полезного действия η **двигателя** — физическая величина, которая характеризует экономичность теплового двигателя и равна отношению работы, совершаемой двигателем за цикл, к количеству теплоты, получаемому от нагревателя:

$$\eta = \frac{A}{Q_1}; \quad \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1},$$

где Q_1 — количество теплоты, полученное от нагревателя; Q_2 — количество теплоты, преданная холодильнику; $A = Q_1 - Q_2$ — работа газа при расширении.

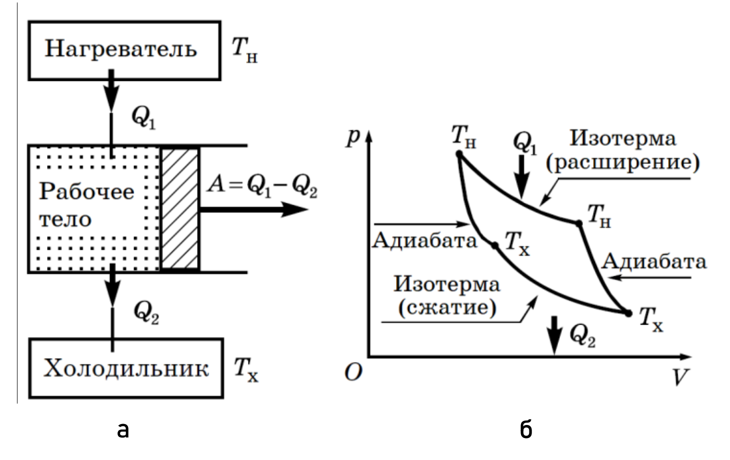


Рис. 105

Если в тепловом двигателе сгорает топливо, то $Q_1 = qm$, где q — удельная теплота сгорания топлива; m — масса топлива.

КПД теплового двигателя всегда меньше единицы.

Теорема Карно: максимальный КПД идеального теплового двигателя (КПД цикла Карно) не зависит от природы рабочего тела и является лишь функцией температур нагревателя ($T_н$) и холодильника ($T_х$):

$$\eta_{max} = \frac{T_н - T_х}{T_н}$$

Холодильная установка — это устройство циклического действия, которое поддерживает в холодильной камере температуру более низкую, чем температура окружающей среды.

Физическая величина, которая характеризует эффективность работы холодильной установки и равна отношению количества теплоты, полученного от холодильной камеры, к работе внешних сил, называется **холодильным коэффициентом** k (рис. 106):

$$k = \frac{Q_2}{A'}; \quad k = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2},$$

где Q_1 — количество теплоты, отданное нагретому телу; Q_2 — количество теплоты, поглощенное из холодильной камеры; $A' = Q_1 - Q_2$ — работа внешних сил (внешние силы за цикл совершают положительную работу).

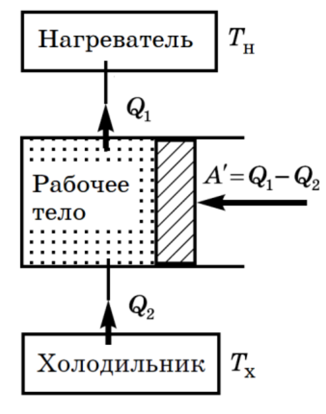


Рис. 106

Из второго закона термодинамики следует, что максимальный холодильный коэффициент равен:

$$k_{max} = \frac{T_х}{T_н - T_х}$$

Холодильный коэффициент может быть больше единицы (в отличие от КПД теплового двигателя).

Холодильной установкой является кондиционер— электрическое устройство, предназначенное для охлаждения воздуха в помещении. Тепловой насос — устройство для обогрева помещения. Современные кондиционеры имеют два режима работы: летом они работают как кондиционеры, зимой — как тепловые насосы.

Некоторые виды тепловых машин

- паровая и газовая турбины;
- паровые машины;
- поршневые двигатели внутреннего сгорания: а) карбюраторные (бензиновые), б) дизели;
- беспоршневые двигатели внутреннего сгорания (реактивные двигатели).

РАЗДЕЛ III. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОСТАТИКИ

§54 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИКИ

Электростатика — раздел физики, изучающий заряженные тела (или частицы), которые находятся в покое, и их взаимодействие.

Электрический заряд q — это физическая величина, характеризующая свойство частиц или тел вступать в электромагнитное взаимодействие.

Единица электрического заряда в СИ — **кулон** (Кл).

1 кулон равен заряду, проходящему через поперечное сечение проводника за 1 секунду, если сила тока в проводнике 1 ампер (Кл = А · с).

Электризация — это процесс приобретения макроскопическими телами электрического заряда.

Основные свойства электрического заряда

1. Существует два рода электрических зарядов — положительные и отрицательные. Электрический заряд такого рода, как заряд, полученный на янтаре или эбонитовой палочке, потертых о шерсть, принято называть отрицательным, а такого рода, как заряд, полученный на палочке из стекла, потертой о шелк, — положительным.
2. Тела, имеющие *заряды одного знака, отталкиваются* (рис. 107, *а*)*; тела, имеющие заряды противоположных знаков, притягиваются* (рис. 107, *б*).
3. *Носителем* электрического заряда является *частица — электрический заряд не существует отдельно от частицы*. Во время электризации тело принимает или отдает некоторое количество частиц, имеющих электрический заряд (электронов).
4. *Электрический заряд является дискретным*, то есть электрические заряды физических тел кратны определенному наименьшему (элементарному) заряду:

$$q = N|e|,$$

где q — заряд тела; N — целое число; e — элементарный заряд.

Носителем наименьшего отрицательного заряда является **электрон**. Этот заряд обозначают символом e: $e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Носителем наименьшего положительного заряда является протон. Заряд протона по модулю равен заряду электрона: $q_p = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

5. И микрочастицы, и макроскопические тела *могут иметь заряд* (положительный или отрицательный), а *могут быть нейтральными*. Нейтральной частицей — частицей, заряд которой равен нулю, — является *нейтрон* (нейтроны и протоны образуют ядро атома).

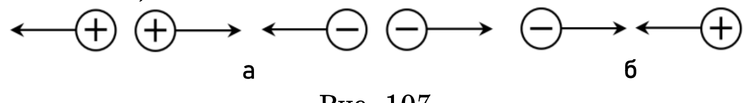


Рис. 107

Первое довольно точное измерение значения элементарного заряда совершил американский физик *Роберт Милликен* во время опытов 1906–1916 гг. Он изучал движение мелких капелек масла в электрическом поле.

Прибор для обнаружения и качественного оценивания электрического заряда называют **электроскопом** (рис. 108, *а*).

Когда к кондуктору *1* касаются исследуемым заряженным телом, то часть заряда тела по металлическому стержню *2* переходит на полоски *3*. Одноименно заряженные тела отталкиваются, поэтому концы полосок расходятся. Когда электроскоп заряжен, то полоски расположены вертикально.

Если полоски электроскопа заменить легкой металлической стрелкой, а на корпусе разместить шкалу, то получим прибор, который называют **электрометром** (рис. 108, *б*).

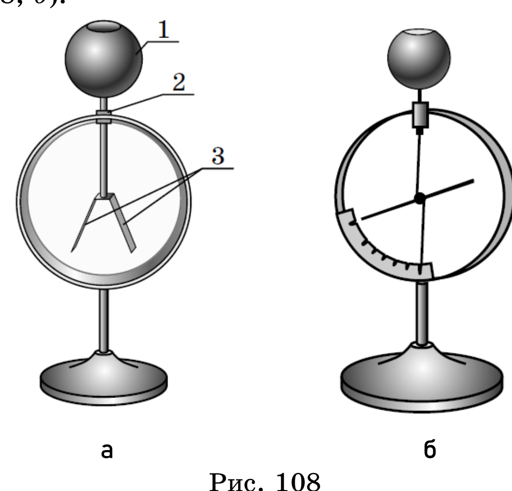


Рис. 108

Способы электризации

1. *Электризация трением*: увеличивается площадь соприкосновения и уменьшается расстояние между атомами трущихся тел.
2. *Электризация постукиванием*.
3. *Электризация соприкосновением с заряженным телом*: при соприкосновении незаряженного тела с заряженным предметом тело получает такой же заряд, какой был у заряженного предмета.
4. *Электризация излучением* (ультрафиолетовые лучи, солнечный свет).

Экспериментально было установлено, что *при электризации происходит перераспределение имеющихся электрических зарядов, а не создание новых*, то есть выполняется **закон сохранения электрического заряда**: полный заряд электрически замкнутой системы тел остается неизменным при любых взаимодействиях, происходящих в этой системе[13]:

$$q_1 + q_2 + ... + q_n = \text{const},$$

где q_1, q_2, ..., q_n — заряды тел, образующих электрически замкнутую систему (n — количество таких тел).

Под электрически замкнутой системой тел понимают такую систему, в которую не проникают заряженные частицы извне и которая не теряет «собственные» заряженные частицы.

---

[13] Данную формулу можно записать иначе:

$$q_{01} + q_{02} + ... + q_{0n} = q_1 + q_2 + ... + q_n.$$

Если тела *одинаковые* и способны проводить электрический ток (проводники), то при их взаимодействии закон сохранения электрического заряда примет вид:

$$q_1 + q_2 + ... + q_n = nQ,$$

где Q — заряд каждого из n тел.

Точечный заряд — это физическая модель заряженного тела, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстояниями от него до других рассматриваемых заряженных тел.

Закон взаимодействия неподвижных точечных зарядов был установлен *Шарлем Кулоном* с помощью специально сконструированных *крутильных весов*.

Закон Кулона: сила F взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов q_1 и q_2 прямо пропорциональна произведению модулей этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними:

$$F = k\frac{|q_1||q_2|}{r^2},$$

где $k = 9 \cdot 10^9\ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$ — постоянный коэффициент пропорциональности в законе Кулона.

Коэффициент пропорциональности k численно равен силе, с которой взаимодействуют два точечных заряда по 1 Кл каждый, расположенные в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга.

Кулоновские силы *направлены вдоль прямой, соединяющей взаимодействующие точечные заряды* (рис. 109).

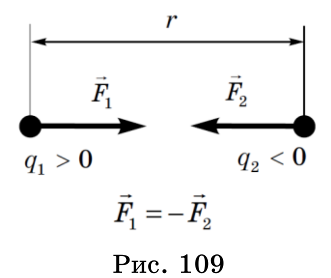


Рис. 109

Иногда вместо коэффициента k применяют другой коэффициент — ε_0, который называют **электрическая постоянная**:

$$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}.$$

Тогда запись закона Кулона имеет вид:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{|q_1||q_2|}{r^2}.$$

Если заряды переместить из вакуума в *диэлектрик* (вещества и материалы, которые плохо проводят электрический ток), то сила их взаимодействия уменьшится в ε раз (см. §57):

$$F = k\frac{|q_1||q_2|}{\varepsilon r^2},$$

где ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

§55 ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ. НАПРЯЖЕННОСТЬ

Электрические заряды не действуют друг на друга непосредственно. Каждый заряд создает в окружающем пространстве электрическое поле, и взаимодействие зарядов происходит через их поля.

Электрическое поле — форма материи (частный случай электромагнитного поля), которая существует вокруг заряженных тел и проявляется в действии с некоторой силой на любое заряженное тело, находящееся в этом поле.

Электрическое поле распространяется в пространстве с огромной, но конечной скоростью, — со скоростью распространения света.

Различают два основных вида электрических полей: электростатическое и вихревое (индукционное).

Электростатические поля — это электрические поля, которые существуют вокруг неподвижных (в данной системе отсчета) тел или частиц, имеющих электрический заряд.

Силы, действующие на заряд со стороны электростатических полей, называют кулоновскими силами.

Вихревые электрические поля — электрические поля, создаваемые переменными магнитными полями.

Вихревые электрические поля не связаны с зарядами, их силовые линии являются замкнутыми.

Для характеристики электрических полей существуют две физические величины: *напряженность* $\vec{E}$ — силовая характеристика поля, *потенциал* φ — энергетическая характеристика поля.

Напряженность электрического поля $\vec{E}$ в данной точке — векторная физическая величина, характеризующая электрическое поле и равная отношению силы $\vec{F}$, с которой электрическое поле действует на пробный заряд, помещенный в данную точку поля, к значению q этого заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Единица напряженности в СИ — **ньютон на кулон** (Н/Кл) или **вольт на метр** (В/м).

За направление вектора напряженности в данной точке электрического поля принимают направление силы, которая действовала бы на пробный положительный заряд, если бы он был помещен в данную точку поля (рис. 110).

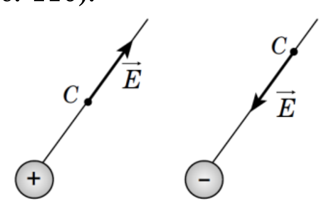


Рис. 110

Пусть точечным зарядом q_0 создано электрическое поле в вакууме. Исследуя это поле с помощью пробного заряда q, расположенного на расстоянии r от заряда q_0. Со стороны поля на пробный заряд у действует сила Кулона $F = k\frac{|q_0||q|}{r^2}$. Модуль напряженности $E = \frac{F}{|q|}$. После подстановки получаем формулу*:

$$E = k\frac{|q_0|}{r^2}$$

Если пространство вокруг заряда заполнить диэлектриком, то напряженность электрического поля, созданного этим зарядом, уменьшится в ε раз (см. §57):

$$E = k\frac{|q_0|}{\varepsilon r^2},$$

где ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

Электрическое поле можно изобразить графически, используя **линии напряженности электрического поля (силовые линии)**, — линии, касательные к которым в любой точке совпадают с направлением вектора напряженности электрического поля (рис. 111, *а*).

Линии напряженности электростатического поля начинаются на положительно заряженном теле и заканчиваются на отрицательно заряженном теле (рис. 111, *б*).

* Данную формулу можно тоже вывести, использовав *теорему Остроградского — Гаусса*.

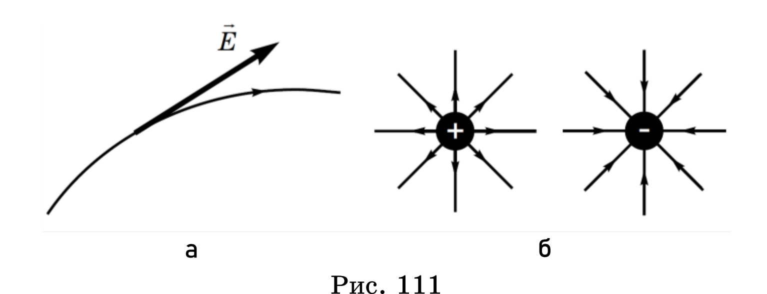


Рис. 111

Если поле создано несколькими зарядами, то результирующая сила, действующая на пробный заряд со стороны системы зарядов, определяется геометрической суммой сил, с которыми эти заряды действуют на данный пробный заряд: $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + ... + \vec{F}_n$, где $\vec{F} = q\vec{E}$. Отсюда следует **принцип суперпозиции (наложения) электрических полей**: напряженность электрического поля системы зарядов в данной точке пространства равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых этими зарядами в данной точке (рис. 112, *а*):

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + ... + \vec{E}_n$$

Поля не взаимодействуют, а накладываются. Заряды взаимодействуют, поскольку поле одного заряда действует на другой, и наоборот.

Плотность силовых линий (см. рис. 111, *а*) *показывает, насколько сильным является электрическое поле:* чем сильнее поле, тем плотнее расположены линии.

Однородное электрическое поле — электрическое поле, векторы напряженности которого одинаковые в любой точке поля.

Линии напряженности однородного поля параллельны и расположены на одинаковом расстоянии друг от друга (рис. 112, *б*).

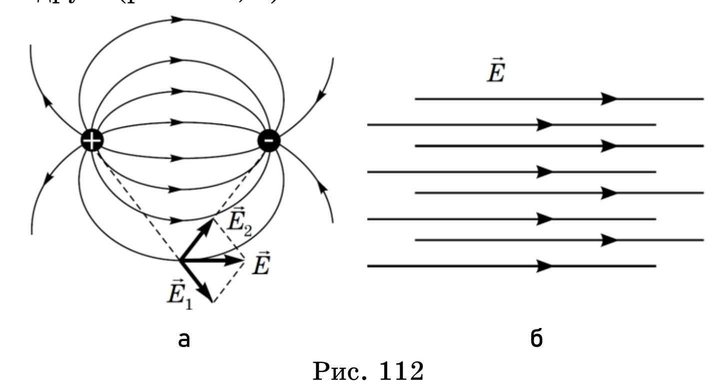


Рис. 112

§56 ПОТЕНЦИАЛ. РАБОТА ПО ПЕРЕМЕЩЕНИЮ ЗАРЯДА В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Электрическое поле действует на электрические заряды с некоторой силой, поэтому при определенных условиях оно способно выполнить работу по перемещению этих зарядов. Значит, в электрическом поле заряженные частицы или тела имеют потенциальную энергию.

Потенциал φ **электростатического поля в данной точке** — это скалярная физическая величина, которая характеризует энергетические свойства поля и равна отношению потенциальной энергии W_p электрического заряда, помещенного в данную точку поля, к значению q этого заряда:

$$\varphi = \frac{W_p}{q}$$

Единица потенциала в СИ — **вольт** (В)

Потенциальную энергию взаимодействия двух точечных зарядов q_1 и q_2, расположенных на расстоянии r друг от друга, определяют по формуле:

$$W_p = k\frac{q_1 q_2}{r}$$

Потенциальная энергия зависит от выбора нулевого уровня. Обычно за нулевой уровень выбирают точку, бесконечно удаленную от зарядов, которые создают поле.

Потенциал φ поля, созданного точечным зарядом q_0, в точках, которые расположены на расстоянии r от данного заряда, можно рассчитать по формуле:

$$\varphi = k\frac{q_0}{r}$$

Из этой формулы следует, что потенциал поля положительного заряда является положительным, а потенциал поля отрицательного заряда — отрицательным.

Если пространство вокруг заряда заполнить диэлектриком, то потенциал электрического поля, созданного этим зарядом, уменьшится в ε раз (см. §57):

$$\varphi = k\frac{q_0}{\varepsilon r},$$

где ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

Под влиянием поля положительный заряд, который не имел начальной скорости, будет двигаться в сторону уменьшения потенциала, отрицательный заряд — в сторону увеличения потенциала (рис. 113).

Если поле создано несколькими произвольно расположенными зарядами, потенциал φ поля в любой точке данного поля равен алгебраической сумме потенциалов $\varphi_1, \varphi_2, ..., \varphi_n$ полей, созданных каждым зарядом:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + ... + \varphi_n$$

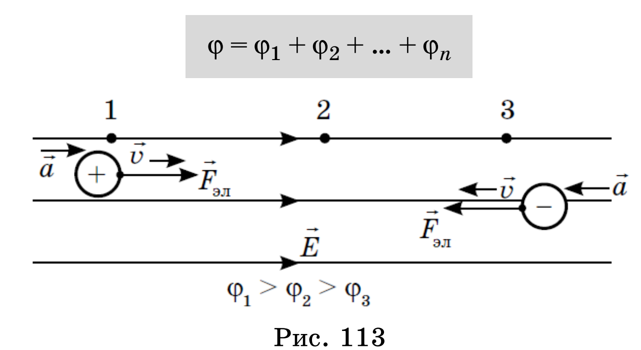


Рис. 113

Когда в электростатическом поле заряженная частица движется, например, с точки 1 в точку 2 (см. рис. 113), то кулоновские силы $\vec{F}_{эл}$, действующие на частицу со стороны поля, выполняют *работу*.

Работа электростатического поля:

- равна изменению потенциальной энергии заряда, взятой с противоположным знаком:
  $A_{1\to2} = -\Delta W_p = W_{p1} - W_{p2} = q\varphi_1 - q\varphi_2$, то есть:

$$A_{1\to2} = q(\varphi_1 - \varphi_2)$$

Данная формула будет справедлива в случаях движения заряда по любой траектории. То есть однородное электростатическое поле является ***потенциальным***. *Потенциальным является любое электростатическое поле.*

- не зависит от того, как двигался заряд, а зависит только от начального и конечного положений заряда;
- на замкнутой траектории равна нулю ($\varphi_1 = \varphi_2 \Rightarrow A = 0$).

Разность потенциалов — скалярная физическая величина, равная отношению работы $A_{1\to2}$ сил электростатического поля по перемещению заряда из начальной точки в конечную к значению q этого заряда:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{1\to2}}{q}$$

Единица разности потенциалов в СИ — **вольт** (В):

Разность потенциалов между двумя точками поля равна 1 В, если для перемещения между ними заряда 1 Кл электростатическое поле совершает работу 1 Дж (В = Дж/Кл).

Напряжение U — это скалярная физическая величина, равная разнице потенциалов между двумя точками электрического поля: $U = \varphi_1 - \varphi_2$.

Для однородного электростатического поля напряжение U (разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$) связано с напряженностью E соотношением:

$$U = Ed, \text{ или } \varphi_1 - \varphi_2 = Ed,$$

где d — проекция расстояния между точками 1 и 2 на силовую линию поля (рис. 114).

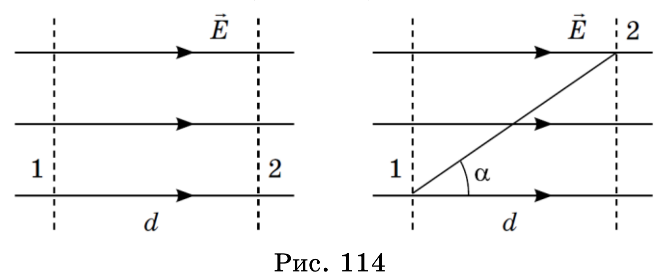


Рис. 114

Изменение потенциала $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ *и разность потенциалов (напряжение)* $U = \varphi_1 - \varphi_2$ *— разные понятия!*

§57 ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

По способности проводить электрические заряды все вещества условно делятся на *проводники, диэлектрики (непроводники), полупроводники*.

Вещества, содержащие электрические заряды, способные свободно передвигаться, называют **проводниками**. В частности, это почва, тело человека, все металлы, водные растворы солей, кислот, щелочей, расплавленные соли и ионизированные газы.

Электрические свойства проводников

1. *Весь статический заряд проводника сосредоточен на его поверхности. Внутри проводник является незаряженным*. Данное свойство является следствием закона Кулона и свойства одноименных зарядов отталкиваться.
2. *Потенциал поля внутри проводника равен потенциалу на его поверхности. Точки поверхности проводника имеют одинаковые потенциалы*. Это значит, что поверхность проводника ***эквипотенциальна*** — это поверхность, во всех точках которой потенциал электростатического поля имеет одинаковое значение.
3. *Вектор напряженности электростатического поля перпендикулярен поверхности проводника* (рис. 115, *а*).
4. *Электрические заряды распределяются по поверхности проводника так, что напряженность электростатического поля проводника оказывается больше на выступах проводника и меньше в его впадинах* (рис. 115, *б*).

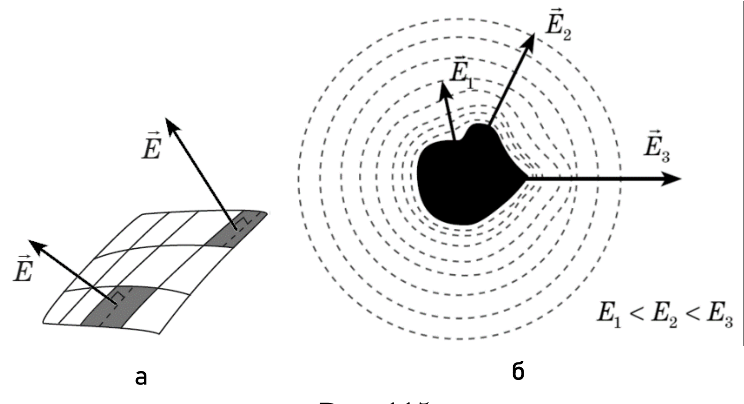


Рис. 115

5. *Напряженность электростатического поля внутри проводника равна нулю:* $E = 0$.

Поместим металлический проводник в электростатическое поле. Металлический проводник состоит из положительных ионов, находящихся в узлах кристаллической решетки, и свободных электронов, которые хаотично движутся. Под действием внешнего электрического поля $\vec{E}_0$ свободные электроны перемещаются в направлении, противоположном направлению $\vec{E}_0$ (рис. 116). В результате на противоположных поверхностях проводника образуются равные по модулю, но противоположные по знаку заряды: в направлении поля — **положительные** (оттуда ушли электроны), против поля — **отрицательные** (пришло определенное количество свободных электронов). Эти заряды создают собственное электрическое поле $\vec{E}'$, которое направлено против внешнего поля.

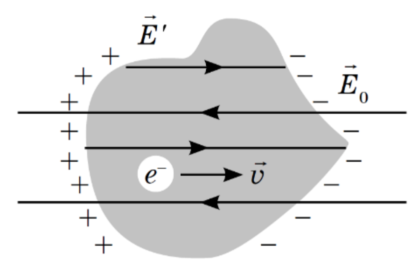


Рис. 116

Электроны будут двигаться до тех пор, пока модуль напряженности собственного электрического поля не сравнится с модулем напряженности внешнего поля: $E_0 = E'$. Поскольку эти векторы противоположно направлены, то напряженность $\vec{E}$ электрического поля внутри проводника равна нулю: $E = E_0 - E' = 0$. Таким образом, на поверхности проводника появляются *наведенные (индуцированные)* электрические заряды, при этом суммарный заряд проводника остается неизменным.

Электростатическая индукция — явление перераспределения зарядов в проводнике, помещенном в электростатическое поле, в результате которого на поверхности проводника наводятся (индуцируются) электрические заряды.

Электростатическая защита — изоляция от электростатического поля металлической сеткой и т. п., которая окружает, например, тело человека, электролампу (рис. 117, *а*).

Благодаря явлению электростатической индукции незаряженный проводник всегда притягивается к заряженному телу (рис. 117, *б*).

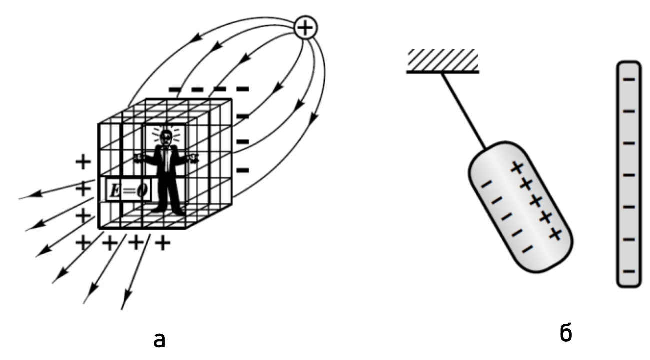


Рис. 117

Вещества, у которых при обычных условиях почти отсутствуют свободные заряды, называют **диэлектриками**. Примерами диэлектриков является янтарь, эбонит, каучук, фарфор, воздух, сухое дерево, капрон и др.

ГРУППЫ ДИЭЛЕКТРИКОВ		
Полярные диэлектрики	**Неполярные диэлектрики**	**Ионные диэлектрики**
Вещества, молекулы которых полярные (вода (H_2O), соль NaCl, спирты и др.): при отсутствии внешнего электростатического поля центры распределения положительных и отрицательных зарядов в молекуле не совпадают, то есть электронные облака смещены к одному из атомов.	*Вещества, молекулы (атомы) которых неполярные* (H_2, O_2, пластмасса, полиэтилен и др.): при отсутствии внешнего электростатического поля центры распределения положительных и отрицательных зарядов, из которых состоит молекула (атом), совпадают. $E_0 = 0$	*Вещества, имеющие ионную структуру* (соли и щелочи). Кристаллические решетки многих ионных диэлектриков можно рассматривать как состоящие из двух вставленных друг в друга подрешеток, каждая из которых образована ионами одного знака. При отсутствии внешнего поля каждая ячейка кристалла в целом электронейтральна.

Электрический дипо́ль — электронейтральная совокупность двух зарядов, равных по модулю и противоположных по знаку, расположенных на некотором расстоянии друг от друга (рис. 118).

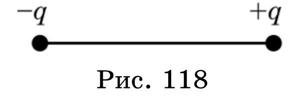


Рис. 118

Во внешнем электрическом поле происходит **поляризация диэлектрика**:

- в полярных диэлектриках диполи ориентируются вдоль линий поля (рис. 119, *а*);
- в ионных диэлектриках ионы разных знаков смещаются в противоположных направлениях;
- в любых диэлектриках происходит поляризация молекул (электронные оболочки атомов и молекул смещают вдоль линий поля) (рис. 119, *б*).

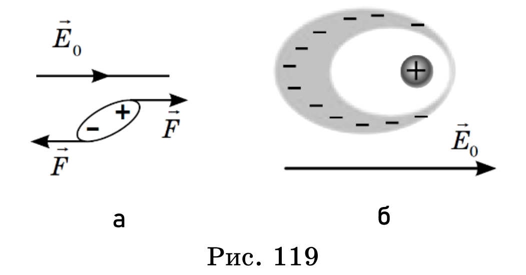


Рис. 119

В результате указанных процессов на противоположных поверхностях диэлектрика образуются связанные заряды противоположных знаков (рис. 120).

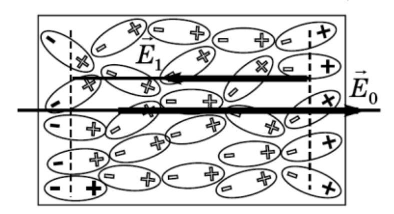


Рис. 120

Благодаря явлению поляризации незаряженный диэлектрик всегда притягивается к заряженному телу (см. рис. 117, *б*).

Связанные заряды на поверхности поляризованного диэлектрика создают в его середине собственное электрическое поле $\vec{E}'$, которое направлено против внешнего поля $\vec{E}_0$, поэтому общая напряженность $\vec{E}$ электрического поля внутри диэлектрика уменьшается.

Диэлектрическая проницаемость ε — это физическая величина, характеризующая диэлектрик и показывает, во сколько раз напряженность E электрического поля внутри диэлектрика меньше напряженности E_0 электрического поля в вакууме[14]:

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}.$$

Есть группа веществ, которые называют **полупроводниками**. При комнатной температуре полупроводники имеют хоть и очень малую, но заметную электропроводность, то есть способны проводить электрический ток. С повышением температуры (или при облучении) их электропроводность возрастает. Полупроводники занимают промежуточное место между проводниками и диэлектриками. К полупроводникам относятся селен, кремний, германий, закись меди и др.

§58 ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ. КОНДЕНСАТОРЫ

Электроемкость уединенного проводника (C) — физическая величина, характеризующая способность проводника накапливать заряд и равная отношению электрического заряда q проводника к его потенциалу φ:

$$C = \frac{q}{\varphi}$$

Единица электроемкости в СИ — **фарад** (Ф).

1 Ф — это электроемкость такого проводника, потенциал которого равен 1 В при сообщении ему заряда 1 Кл (Ф = Кл/В).

Электроемкость зависит от размеров и формы проводника, а также от диэлектрической проницаемости среды, в которой он находится, но *не зависит* от заряда проводника и его потенциала.

Конденсатор — устройство, представляющее собой систему из двух проводящих обкладок, разделенных тонким слоем диэлектрика (рис. 121).

14 Утверждение о том, что диэлектрик всегда уменьшает напряженность электростатического поля, в котором он расположен, в ε раз, является не всегда правильным, — оно оказывается правильным только для случаев, когда силовые линии внешнего поля перпендикулярны к границам тела или эти границы так далеко, что полем поляризационных зарядов можно пренебречь.

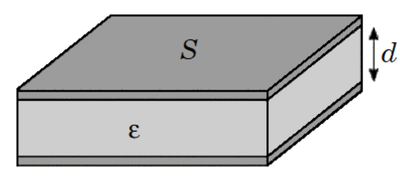


Рис. 121

Обкладки конденсатора имеют одинаковые по модулю, но противоположны по знаку заряды. Заряд конденсатора — это модуль заряда одной из его обкладок.

Конденсаторы являются непреодолимым препятствием для постоянного тока. В участке цепи, которая содержит конденсатор, постоянный ток не идет.

Конденсаторы можно классифицировать по следующим признакам и свойствам:

- *по назначению* — постоянной и переменной емкости;
- *по форме обкладок* — плоские, сферические, цилиндрические и др.;
- *по типу диэлектрика* — воздушные, бумажные, слюдяные, керамические, электролитические и др.

Электроемкость (емкость) конденсатора — физическая величина, характеризующая конденсатор и равная отношению заряда q к разнице потенциалов между его обкладками ($U = \varphi_1 - \varphi_2$):

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}$$

Электроемкость конденсатора на электрических схемах[15] обозначают так:



Конденсатор, состоящий из двух параллельных металлических пластин (обкладок), разделенных слоем диэлектрика, называют *плоским* (см. рис. 121). **Электроемкость плоского конденсатора** вычисляют по формуле:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d},$$

где ε — диэлектрическая проницаемость среды между пластинами конденсатора, S — площадь пластины конденсатора, $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$ — электрическая постоянная, d — расстояние между пластинами.

Электрическое поле между обкладками плоского конденсатора однородно, поэтому напряженность E этого поля связана с напряжением U между пластинами соотношением:

$$U = Ed.$$

Заряженный конденсатор, как и любая другая система заряженных тел, обладает энергией. ***Энергия** заряженного W_p до напряжения U конденсатора, имеющего электроемкость C и заряд q, равна**:

$$W_p = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

15 *Электрическая схема* — это чертеж, на котором условными обозначениями показано, из каких элементов состоит электрическая цепь и каким образом эти элементы соединены между собой.

* Подставляя формулы $U = Ed$ и $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$ в формулу $W_p = \frac{CU^2}{2}$, получим формулу энергии плоского конденсатора:

$$W_p = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 V E^2}{2}.$$

Здесь $w = \frac{W_p}{V} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}$ — *объемная плотность энергии*, которая измеряется в джоулях на кубический метр (Дж/м³).

Чтобы получить необходимую емкость конденсаторы соединяют между собой в батареи.

Если батарея конденсаторов подключена к источнику тока, то общее напряжение на батарее не изменяется при любых изменениях, происходящих в батареи.

Если батарея конденсаторов отключена от источника тока, то не меняется общий заряд батареи.

СОЕДИНЕНИЯ КОНДЕНСАТОРОВ	
Последовательное	C_1, C_2, C_3, C_n, U **Заряд:** $q = q_1 = q_2 = ... = q_n$ **Напряжение:** $U = U_1 + U_2 + ... + U_n$ **Электроемкость:** $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + ... + \frac{1}{C_n}$ Если батарея содержит n последовательно соединенных конденсаторов электроемкостью C' каждый, то: $\frac{1}{C} = \frac{n}{C'}$, или $C = \frac{C'}{n}$
Параллельное	C_1, C_2, C_3, C_n, U **Заряд:** $q = q_1 + q_2 + ... + q_n$ **Напряжение:** $U = U_1 = U_2 = ... = U_n$ **Электроемкость:** $C = C_1 + C_2 + ... + C_n$ Если батарея содержит n параллельно соединенных конденсаторов электроемкостью C' каждый, то: $C = nC'$

ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§59 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Электродинамика — раздел физики, изучающий явления, обусловленные движением электрических зарядов.

Электрический ток — это направленное (упорядоченное) движение частиц, имеющих электрический заряд.

За направление тока в цепи условно принято направление, в котором двигались бы по цепи частицы, имеющие положительный заряд, то есть направление от положительного полюса источника тока к отрицательному.

Условия существования тока

1. *Наличие свободных заряженных частиц* — носителей тока.
2. *Наличие электрического поля*, действие которого создает и поддерживает направленное движение свободных заряженных частиц.
3. *Замкнутая электрическая цепь* (рис. 122).

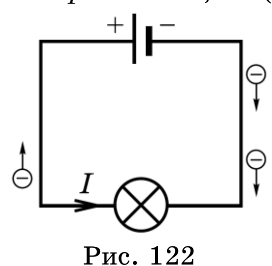


Рис. 122

В металлах свободные носители заряда — это *свободные электроны* (направление движения электронов противоположно направлению тока).

Источники тока — устройства, которые превращают различные виды энергии в электрическую энергию.

Условные обозначения некоторых элементов электрической цепи

Элемент электрической цепи	Условное обозначение
Гальванический элемент или аккумулятор	
Батарея гальванических элементов или аккумуляторов	
Соединение проводов	
Сечение проводов (без соединения)	
Резистор	
Реостат	
Штепсельное соединение	
Зажимы для подключения участка цепи	
Ключ	
Нагревательный элемент	
Предохранитель	
Лампа накаливания	
Светодиод	
Катушка индуктивности; соленоид	
Электромагнит	
Гальванометр	

Сила тока I — скалярная физическая величина, характеризующая электрический ток и численно равна заряду q, проходящего через поперечное сечение проводника за время t:

$$I = \frac{q}{t}$$

Единица силы тока в СИ — **ампер** (А).

Ампер — сила тока, который, проходя по двум параллельным проводникам бесконечной длины и пренебрежимо малой площади сечения, расположенных в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга, вызвал бы на каждом участке проводников длиной 1 м силу взаимодействия $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

Прибор для измерения силы тока — амперметр (рис. 123, *а*).

Амперметр на электрических схемах обозначают так:



Амперметр включают в цепь последовательно с устройством, силу тока в котором измеряют (рис. 123, *б*).

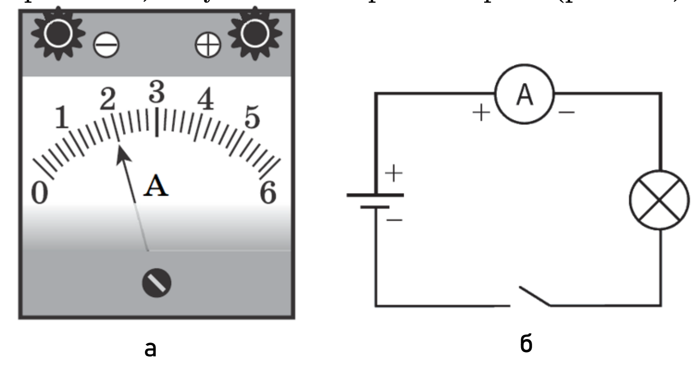


Рис. 123

Электрическое напряжение U — физическая величина, характеризующая электрическое поле на участке цепи и численно равна работе A электрического поля по перемещению по этому участку заряда q:

$$U = \frac{A}{q}$$

Единица напряжения в СИ — **вольт** (В).

1 В — это такое напряжение на участке цепи, при котором электрическое поле выполняет работу 1 Дж, перемещая по этому участку заряд 1 Кл (В = Дж/Кл).

Прибор для измерения напряжения — вольтметр (рис. 124, *а*).

Вольтметр на электрических схемах обозначают так:



Вольтметр включают в цепь параллельно устройству, напряжение на котором измеряют (рис. 124, *б*).

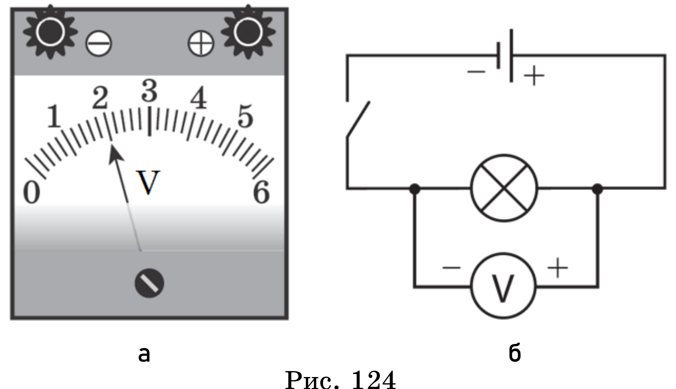


Рис. 124

Электрическое сопротивление R — физическая величина, характеризующая свойство проводника противодействовать электрическому току. Сопротивление обусловлено взаимодействием свободных носителей заряда с другими частицами проводника.

Единица сопротивления в СИ — **ом** (Ом).

1 Ом — сопротивление такого проводника, в котором при напряжении на его концах 1 В течет ток силой 1 А (Ом = В/А).

Сопротивление проводника зависит только от свойств самого проводника: материала, геометрических размеров, температуры и др.

Сопротивление амперметра и вольтметра

1. Для того чтобы наличие амперметра почти не влияло на ток в цепи, сопротивление амперметра должно быть очень малым ($R_A \to 0$). Именно поэтому амперметр нельзя присоединять к цепи, в котором отсутствует потребитель тока; амперметр нельзя присоединять и параллельно участку цепи. Сопротивление идеального амперметра равно нулю.
2. Для того чтобы наличие вольтметра почти не влияло на ток в цепи, сопротивление вольтметра должно быть очень большим ($R_V \to \infty$). Если вольтметр присоединить последовательно с устройством, то ток в этой области почти прекратится. Сопротивление идеального вольтметра считают бесконечно большим, поэтому сила тока в участке, содержащая идеальный вольтметр, пренебрежимо мала.

Сопротивление металлического проводника цилиндрической формы (провода), который имеет неизменное поперечное сечение, рассчитывают по формуле:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где ρ — удельное сопротивление вещества, из которого изготовлен проводник; l — длина проводника; S — площадь поперечного сечения проводника.

Электрическое сопротивление измеряют омметром (рис. 125, *а*) или с помощью амперметра и вольтметра (рис. 125, *б*).

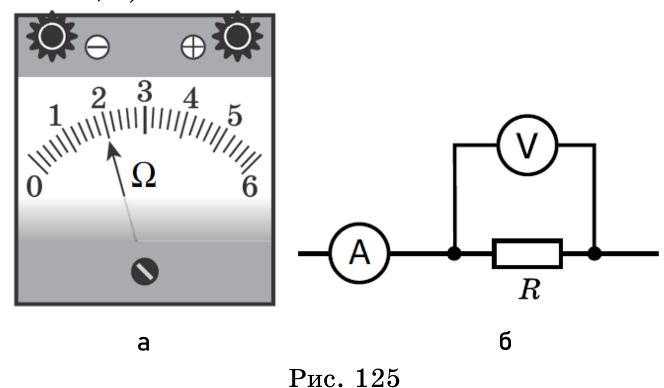


Рис. 125

Нерегулируемые устройства, включаются в цепь для изменения его сопротивления, называются резисторами.

Для регулирования силы тока в цепи применяют реостаты — устройства, сопротивление которых можно изменять, передвигая ползунок вдоль обмотки.

Удельное сопротивление ρ — физическая величина, характеризующая материал проводника и численно равная сопротивлению изготовленного из данного материала цилиндрического проводника длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 м^2.

Единица удельного сопротивления в СИ — **ом-метр** (Ом · м).

Если площадь поперечного сечения проводника представлена в мм^2, то пользуются единицей $1\ \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}}{\text{мм}^2}$:

$$1\ \text{Ом} \cdot \text{м} = 1 \cdot 10^{-6}\ \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}}{\text{мм}^2}.$$

Значение удельного сопротивления вещества обусловлено *химической природой вещества* и существенно *зависит от температуры*.

Закон Ома для участка цепи: сила тока I в участке цепи прямо пропорциональна напряжению U на концах участка и обратно пропорциональна сопротивлению R этого участка:

$$I = \frac{U}{R}$$

График зависимости силы тока от напряжения $I(U)$ (вольт-амперная характеристика (ВАХ)) для металлических проводников и электролитов — прямая линия (рис. 126). Чем больше угол наклона графика к оси напряжения, тем меньше сопротивление проводника.

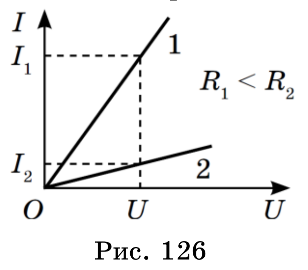


Рис. 126

§60 СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ. ШУНТЫ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Чтобы получить необходимое сопротивление, проводники соединяют между собой в батареи.

СОЕДИНЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ	
Последовательное	R_1, R_2, R_n **Сила тока:** $I = I_1 = I_2 = ... = I_n$ **Напряжение:** $U = U_1 + U_2 + ... + U_n$ **Сопротивление:** $R = R_1 + R_2 + ... + R_n$ Если есть n одинаковых резисторов сопротивлением R' каждый, то: $R = nR'$
Параллельное	**Сила тока:** $I = I_1 + I_2 + ... + I_n$ **Напряжение:** $U = U_1 = U_2 = ... = U_n$ **Сопротивление:** $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + ... + \frac{1}{R_n}$ R_1, R_2, R_n Если батарея содержит n параллельно соединенных проводников сопротивлением R' каждый, то: $\frac{1}{R} = \frac{n}{R'}$, или $R = \frac{R'}{n}$

Шунт — резистор, который параллельно присоединяют к амперметру с целью увеличить верхний предел измерения амперметра (рис. 127).

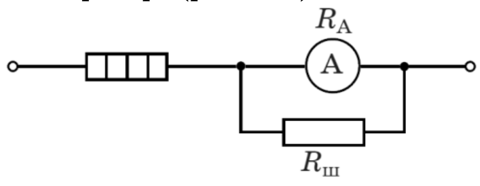


Рис. 127

При использовании шунта ток в цепи разделяется на две части: одна часть идет на амперметр, вторая — на шунт: $I = I_А + I_ш$.

При присоединении параллельно амперметру шунта увеличивается верхняя граница амперметра в n раз: $I = nI_А$. Следовательно, $nI_А = I_А + I_ш$, или $I_ш = I_А(n - 1)$.

Напряжение на шунте и амперметре одинаковое ($U_ш = U_А$), поэтому согласно закону Ома необходимое сопротивление шунта рассчитывают по формуле:

$I_ш R_ш = I_А R_А \Rightarrow I_А(n-1)R_ш = I_А R_А$, то есть:

$$R_ш = \frac{R_А}{n-1}$$

Дополнительное сопротивление — резистор, который последовательно присоединяют к вольтметру с целью увеличить верхний предел измерения вольтметра (рис. 128).

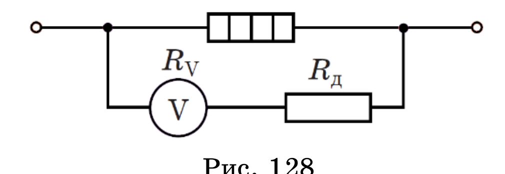


Рис. 128

При использовании дополнительного сопротивления напряжение распределится между вольтметром и дополнительным сопротивлением: $U = U_V + U_д$.

При присоединении последовательно вольтметру дополнительного сопротивления увеличится верхняя граница вольтметра в n раз: $U = nU_V$. Следовательно, $nU_V = U_V + U_д$, или $U_д = U_V(n - 1)$.

Сила тока в резисторе и вольтметре одинаковая ($I_д = I_V$), поэтому согласно закону Ома необходимое дополнительное сопротивление вычисляют по формуле:

$\frac{U_д}{R_д} = \frac{U_V}{R_V} \Rightarrow \frac{U_V(n-1)}{R_д} = \frac{U_V}{R_V}$, то есть:

$$R_д = R_V(n - 1)$$

Во сколько раз возрастает верхний предел измерения прибора, во столько раз возрастает цена деления его шкалы.

§61 РАБОТА И МОЩНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА. ЗАКОН ДЖОУЛЯ — ЛЕНЦА

Работа A электрического тока на участке цепи — работа сил электрического поля, которая создает электрический ток:

$$A = qU = UIt,$$

где U — напряжение на участке цепи; q — заряд, который проходит по участку за время t.

Единица работы электрического тока в СИ — **джоуль** (Дж = В · А · с):

Существует также внесистемная единица работы тока — киловатт-час (кВт · ч):

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3{,}6 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

Прибор для прямого измерения работы тока — счетчик электрической энергии. Работу тока можно измерить косвенным методом — с помощью амперметра, вольтметра и секундомера.

Мощность электрического тока P — физическая величина, характеризующая скорость выполнения током работы (характеристика потребителей и источников электрической энергии) и равна отношению работы A тока ко времени t, за которое эта работа выполнена:

$$P = \frac{A}{t}, \text{ или } P = UI$$

Прибор для прямого измерения мощности тока — ваттметр. Мощность можно измерить косвенным методом — с помощью амперметра и вольтметра.

Закон, определяющий количество теплоты, которая выделяется в проводнике с током и которую он отдает окружающей среде, называется **закон Джоуля — Ленца**: количество теплоты Q, которое выделяется в проводнике с током, прямо пропорционально квадрату силы тока I, сопротивлению R проводника и времени t прохождения тока:

$$Q = I^2Rt$$

Если участок цепи содержит *только потребители, в которых вся электрическая энергия расходуется только на нагрев* (резисторы, нагревательные элементы и т. д.), работа тока равна количеству теплоты. В этом случае *и работу тока, и количество теплоты* можно определить по любой из формул:

$$A = Q = UIt = I^2Rt = \frac{U^2t}{R},$$

а *мощность тока* — по любой из формул:

$$P = UI = I^2R = \frac{U^2}{R}$$

Если ток в цепи выполняет механическую работу (работает двигатель) или происходят химические реакции, то работу тока можно определить только по формуле: $A = UIt$, а количество теплоты, которая при этом выделяется, является потерями энергии: $Q = I^2Rt$.

§62 ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ

Сторонние силы — это любые силы неэлектростатического происхождения, которые действуют на электрически заряженные частицы.

Сторонние силы действуют на свободные носители зарядов внутри источника тока и перемещают их. Таким образом, в источнике тока выполняется работа по разделению разноименных электрических зарядов: на одном полюсе источника тока накапливается положительный заряд, на втором — отрицательный.

В зависимости от того, за счет какой энергии выполняется работа по разделению зарядов различают: *химические* (гальванические элементы и аккумуляторы), *тепловые* (термопары), *световые* (фотоэлементы), *электромагнитные* (генераторы) *источники тока*.

Электродвижущая сила (ЭДС) $\mathcal{E}$ **источника тока** — скалярная физическая величина, характеризующая энергетические свойства источника тока и равна отношению работы сторонних сил $A_{ст}$ по перемещению положительного заряда q внутри источника к значению этого заряда:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{ст}}{q}$$

Единица ЭДС в СИ — **вольт** (В).

Простейшая полная электрическая цепь (рис. 129) состоит из двух участков:

1. Внешний участок цепи — потребитель (или потребители) тока и соединительные провода. Общее сопротивление участка R, а напряжение U на участке равно напряжению на полюсах источника тока. На внешнем участке действуют только кулоновские силы.
2. Внутренний участок цепи — это непосредственно источник тока, который характеризуется внутренним сопротивлением r (сопротивление источника тока) и электродвижущей силой $\mathcal{E}$. На этом участке действуют как кулоновские, так и сторонние силы.

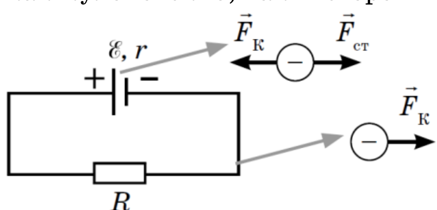


Рис. 129

Зависимость напряжения от работы

1. Во время действия только кулоновских сил ($A = A_к$):
$$U = \varphi_1 - \varphi_2.$$
2. Во время действия только сторонних сил ($A = A_{ст}$):
$$U = \mathcal{E}.$$
3. Во время действия кулоновских и сторонних сил ($A = A_к + A_{ст}$):
$$U = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}.$$

Закон Ома для полной цепи*: сила тока I в полной цепи равна отношению ЭДС источника тока $\mathcal{E}$ к полному сопротивлению цепи ($R + r$):

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

Следствия закона Ома для полной цепи

1. Напряжение на полюсах замкнутого источника тока (рис. 130, *а*):
$$U = \mathcal{E} - Ir.$$
2. Напряжение на полюсах незамкнутого источника тока (рис. 130, *б*):
$$U = \mathcal{E} \text{ при } R_{вольтметра} \gg r.$$
3. Подключение к источнику тока проводника с очень малым сопротивлением ($R \to 0$) вызывает *короткое замыкание* (рис. 130, *в*). Сила тока короткого замыкания является максимальной для данного источника и определяется по формуле:

$$I_{к.з} = \frac{\mathcal{E}}{r},$$

где $\mathcal{E}$ — ЭДС источника тока; r — внутреннее сопротивление источника.

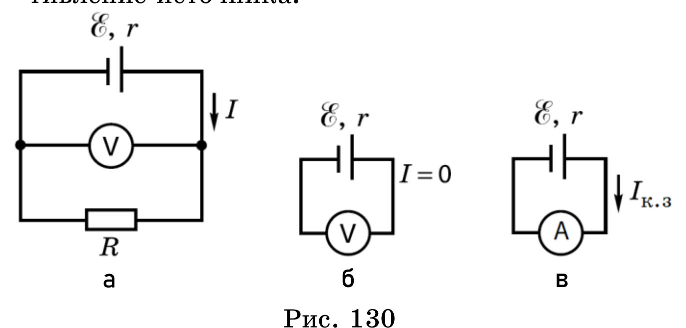


Рис. 130

Коэффициент полезного действия (КПД) η источника тока определяется как отношение мощности $P_п = UI$, которую потребляет внешняя часть цепи (полезная мощность), к полной (затраченной) мощности $P_з = \mathcal{E}I$, которую развивает источник тока:

$$\eta = \frac{P_п}{P_з} = \frac{U}{\mathcal{E}},$$

где U — напряжение на внешней цепи; $\mathcal{E}$ — ЭДС источника тока.

СОЕДИНЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ТОКА	
Последовательное	Каждый из n последовательно соединенных одинаковых источников тока имеет ЭДС $\mathcal{E}_0$ и внутреннее сопротивление r_0, общая ЭДС батареи увеличивается: $\mathcal{E} = n\mathcal{E}_0$. Внутреннее сопротивление увеличивается в n раз: $r = nr_0$
Параллельное	Каждый из n параллельно соединенных одинаковых источников тока имеет ЭДС $\mathcal{E}_0$ и внутреннее сопротивление r_0, общая ЭДС батареи не изменяется: $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0$. Внутреннее сопротивление уменьшается в n раз: $r = \frac{r_0}{n}$

* Закон Ома устанавливает зависимость между силой тока, напряжением и сопротивлением для простейшей электрической цепи, которая представляет собой один замкнутый контур. Значение сил токов и напряжений для разветвленных электрических цепей, которые имеют несколько замкнутых контуров и несколько узлов, к которым сходятся токи, проходящие в отдельных ответвлениях, можно находить с помощью *правил Кирхгофа*.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

§63 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ

Электрический ток могут проводить жидкости и твердые вещества, при определенных условиях электрический ток проводят и газы.

Название среды	Носители заряда
Металлы	Свободные электроны, которые присутствуют всегда
Электролиты	Свободные положительные и отрицательные ионы, образующиеся в результате электролитической диссоциации
Газы, плазма	Свободные электроны, положительные и отрицательные ионы, образующиеся в результате ионизации
Вакуум	Электроны, вылетевшие с поверхности электрода вследствие эмиссии
Полупроводники	Направленное движение свободных электронов и дырок (свободных и связанных электронов)

Валентные электроны *в металлах* легко оставляют свои атомы и становятся свободными, поэтому кристаллическая решетка металлов образована положительными ионами, которые находятся в «газе» свободных электронов. При отсутствии электрического поля свободные электроны металлов движутся хаотично (тепловое движение электронов). Если в металлическом проводнике создать электрическое поле, то свободные электроны, не прекращая хаотического движения, начинают смещаться в сторону положительного полюса источника тока (в сторону, противоположную направлению напряженности электрического поля). Электронную проводимость металлов экспериментально доказали американские физики *Р. Толмен* и *Т. Стюард* в 1916 г.

Электрический ток в металлах представляет собой направленное движение свободных электронов.

Вольт-амперная характеристика (график зависимости силы тока от приложенного напряжения) металлического проводника следует из закона Ома (рис. 131).

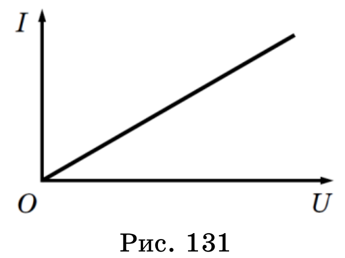


Рис. 131

За интервал времени t через сечение площадью S проводника проходит N заряженных частиц: $N = nS\bar{v}t$, где n — концентрация таких частиц в проводнике, $\bar{v}$ — средняя скорость направленного движения таких частиц. При этом переносится заряд $q = N|e|$. По определению: $I = \frac{q}{t}$, откуда имеем:

$$I = n|e|\bar{v}S$$

С увеличением температуры сопротивление и удельное сопротивление металлического проводника увеличиваются (рис. 132):

$$R = R_0(1 + \alpha t) \quad \text{или} \quad \rho = \rho_0(1 + \alpha t),$$

где R_0, ρ_0 — соответственно сопротивление и удельное сопротивление проводника при температуре 0 °C; R, ρ — соответственно сопротивление и удельное сопротивление проводника при температуре t; α — *температурный коэффициент сопротивления*.

Температурный коэффициент сопротивления — это физическая величина, характеризующая зависимость удельного сопротивления вещества от температуры.

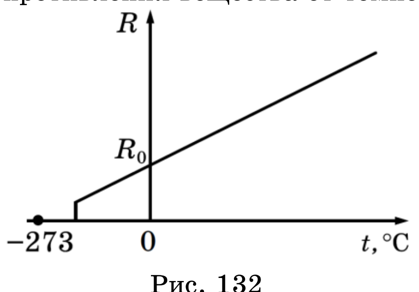


Рис. 132

Единица температурного коэффициента в СИ — **обратный кельвин** (кельвин в минус первой степени) ($К^{-1}$).

Явление сверхпроводимости

У некоторых металлов и сплавов при снижении температуры до температуры, близкой к абсолютному нулю (0,2–24 К), сопротивление скачком падает до нуля (см. рис. 132). Если в замкнутом металлическом проводнике, который находится в сверхпроводящем состоянии, создать электрический ток, то он будет существовать в проводнике без источника тока неограниченное время.

Явление сверхпроводимости открыл в 1911 г. нидерландский физик *Хейке Камерлинг-Оннес*.

Термоэлектрические явления — совокупность физических явлений, обусловленных взаимосвязью между тепловыми и электрическими процессами в твердых проводниках.

§64 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЭЛЕКТРОЛИТАХ

Электролиты — твердые или жидкие вещества, которые имеют ионную проводимость. Например, это растворы $NaCl$, $CuSO_4$, расплав $NaOH$.

Распад веществ на ионы в результате действия полярных молекул растворителя называют **электролитической диссоциацией**. При растворении солей, кислот и оснований в воде ионная связь у них становится слабее в ε раз, и при тепловых соударениях их молекулы распадаются на ионы (рис. 133).

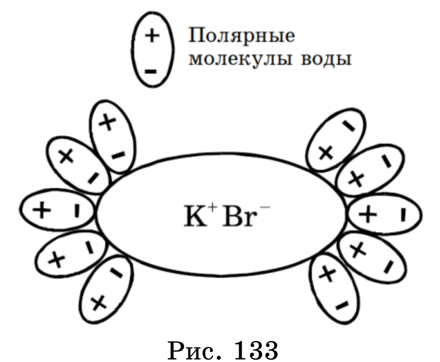


Рис. 133

Электрический ток в электролитах представляет собой направленное движение положительных и отрицательных ионов.

Вольт-амперная характеристика электролитов следует из закона Ома (см. рис. 131).

С увеличением температуры сопротивление и удельное сопротивление электролита уменьшается. Это обусловлено тем, что с увеличением температуры увеличивается концентрация свободных ионов.

Рекомбинация — объединение ионов различных знаков в нейтральные молекулы — процесс, противоположный диссоциации.

Механизм ионной проводимости: под действием электрического поля положительные ионы движутся к катоду (катионы), а отрицательные — к аноду (анионы) и замыкают электрическую цепь. При этом вместе с зарядом переносится вещество (рис. 134).

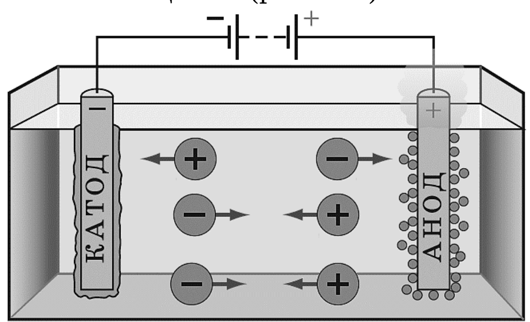


Рис. 134

Электролиз — процесс выделения веществ на электродах, который связан с окислительно-восстановительными реакциями, происходящими на электродах при прохождении тока.

Впервые явление электролиза подробно изучил английский физик *М. Фарадей*. Точно измеряя массы веществ, которые выделялись на электродах при электролизе, ученый сформулировал *два закона электролиза*.

Первый закон Фарадея: масса m вещества, выделившегося на электроде при электролизе, прямо пропорциональна силе тока I и времени t его прохождения через электролит:

$$m = kq = kIt,$$

где $q = It$ — заряд, прошедший через электролит; k — коэффициент пропорциональности, который называют *электрохимическим эквивалентом*.

Единица электрохимического эквивалента в СИ — **килограмм на кулон** (кг/Кл).

Второй закон Фарадея: электрохимический эквивалент k прямо пропорционален отношению молярной массы M элемента к валентности n этого элемента в данном химическом соединении:

$$k = \frac{M}{Fn},$$

где F — *постоянная Фарадея*, которая определяется как произведение модуля заряда электрона на постоянную Авогадро: $F = |e|N_A = 9{,}65 \cdot 10^4$ Кл/моль.

Применение электролиза

1. *Гальваностегия* — электролитический способ покрытия изделия тонким слоем металла (золочение, никелирование, хромирование и т. д.).
2. *Гальванопластика* — это получение с помощью электролиза точных копий рельефных изделий (получение матриц для печатных пластин, барельеф и т. д.).
3. *Электрометаллургия:* выделение чистых металлов из природных смесей и промышленных отходов (меди с медного колчедана, алюминия с расплавленного боксита, серебра из отходов фотопроизводства).
4. *Очистка металлов (рафинирование)* — в ванну с раствором соли металла, который очищается, опускают два электрода. Толстая пластина неочищенного металла служит анодом, а тонкая пластина чистого металла — катодом. При прохождении тока металл переносится на катод, а примеси оседают на дно ванны.
5. *Производство металлов.*
6. *Очистка сточных вод.*

§65 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ

В отличие от металлов и электролитов газы состоят из электрически нейтральных атомов и молекул и при обычных условиях почти не содержат свободных носителей тока, то есть являются диэлектриками.

В результате нагревания или влияния излучения часть атомов ионизируется — делится на положительно заряженные ионы и электроны (рис. 135, *а*). При соединении электронов с нейтральными атомами образуются и отрицательно заряженные ионы (кроме инертных газов и азота).

Процесс образования в газе положительных и отрицательных ионов и свободных электронов из нейтральных молекул и атомов называют **ионизацией**.

Чтобы заставить электрон покинуть атом, необходимо предоставить ему определенную минимальную энергию — *энергию ионизации* (W_i), которая зависит от химической природы газа.

Если *ионизированный* газ поместить в электрическое поле, то под действием поля отрицательные ионы и электроны будут двигаться к аноду (положительному электроду), а положительные ионы — к катоду (отрицательному электроду). В пространстве между электродами возникнет ток.

Электрический ток в газах — газовый разряд — представляет собой направленное движение свободных электронов, положительных и отрицательных ионов.

В отличие от электролитов, при газовом разряде на электродах не выделяется вещество.

Если устранить ионизатор, то газовый разряд прекращается. Прекращение газового разряда имеет несколько причин.

1. В ионизированном газе, как и в электролитах, происходит рекомбинация молекул (рис. 135, *б*).
2. Свободные электроны поглощаются анодом.
3. Свободные ионы у электродов превращаются в нейтральные частицы: отрицательные ионы «отдают» «лишние» электроны аноду, а положительные ионы «забирают» электроны, которых им «не хватает», у катода. После этого нейтральные частицы (молекулы и атомы) возвращаются в газ.

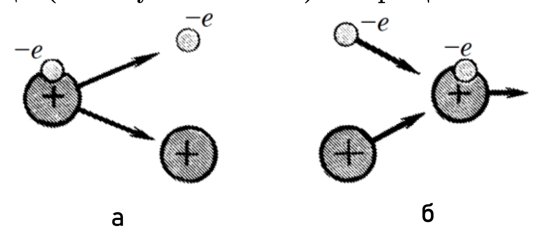


Рис. 135

Газовый разряд, который происходит только во время действия внешнего ионизатора, называют **несамостоятельным газовым разрядом**.

Вольт-амперная характеристика газового разряда (рис. 136).

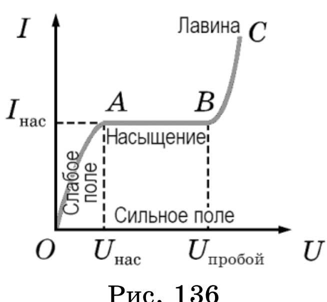


Рис. 136

Участок ОА: зависимость силы тока от напряжения подчиняется закону Ома.

Участок АВ: в сильном электрическом поле все заряженные частицы, которые создает ионизатор, долетают до электродов. *Наибольшую силу тока, возможная вследствие действия данного ионизатора, называют* ***током насыщения***.

Участок ВС: сила тока резко возрастает при незначительном увеличении напряжения благодаря ***ионизации газа электронным ударом***, в результате чего количество свободных заряженных частиц лавинообразно увеличивается.

Участок графика ОАВ — несамостоятельный разряд, *участок ВС* соответствует самостоятельному разряду в газах.

Газовый разряд, который происходит без воздействия внешнего ионизатора, называют **самостоятельным газовым разрядом**.

Самостоятельный разряд происходит в результате ионизации электронным ударом (рис. 137) и электронной эмиссии (испускание) электронов с поверхности катода.

Существует несколько типов самостоятельных газовых разрядов, среди которых различают искровой, коронный, дуговой и тлеющий.

ВИДЫ САМОСТОЯТЕЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ РАЗРЯДОВ	
Искровой газовый разряд	*Возникает* при атмосферном давлении и большом напряжении между электродами. Имеет вид ярких зигзагообразных полос, которые разветвляются, длится всего несколько десятков микросекунд и обычно сопровождается звуковыми эффектами (потрескивание, треск, гром и т. д.). *Используют* в воспалительных свечах бензиновых двигателей, для обработки особо прочных металлов, для предотвращения перенапряжении линий электропередачи (искровые разрядники). Пример грандиозного искрового разряда в природе — молния.
Коронный газовый разряд	*Возникает* при давлении порядка атмосферного в сильном ($E > 500$ кВ/м), резко неоднородном электрическом поле. Такие поля формируются вблизи электродов с большой кривизной поверхностью (острия, тонкой проволоки и т. д.). Представляет собой слабое фиолетовое свечение в виде короны (пучков, кистей). *Используют* для очистки газов (электрофильтры), в счетчиках элементарных частиц (счетчики Гейгера — Мюллера) на возникновении этого разряда основывается действие молниеотвода. В природе обычно наблюдается перед грозой или во время грозы на острых концах высоких предметов (башен, мачт, вершин скал и т. п.); имеет еще одно название — «огни святого Эльма».
Дуговой газовый разряд	*Возникает* при высокой температуре (более 4000 °C) и почти при любом давлении. Представляет собой яркое дугообразное пламя. При такой высокой температуре с поверхности катода непрерывно «испаряются» электроны, а в столбе раскаленного газа происходит термическая ионизация. Высокая температура катода и анода поддерживается бомбардировкой электродов положительными и отрицательными ионами и электронами, ускоренными электрическим полем. *Используют* в металлургии (электропечи, сварка жаром электрической дуги металлов), как мощный источник света в прожекторах и т. п.
Тлеющий газовый разряд	*Возникает* при небольшом напряжении между электродами и низком давлении (десятые и сотые доли миллиметра ртутного столба): по указанному давлению расстояние между молекулами такова, что даже в слабом электрическом поле электроны разгоняются до такой скорости, что приобретают энергию, достаточную для ударной ионизации. *Используют* в лампах дневного света (люминесцентных трубках), цветных газоразрядных трубках (цвет свечения определяется природой газа). Важнейшая область применения — квантовые генераторы света (газовые лазеры).

Плазма — это частично или полностью ионизированный газ, в котором концентрации положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы. Возникает при всех видах разрядов в газах.

Плазмой окружена наша планета. Верхний слой атмосферы на высоте 100–300 км представляет собой ионизированный газ — ионосферу. В плазменном состоянии находится 99 % вещества во Вселенной: в этом состоянии — вещество в звездах и галактических туманностях, плазмой заполнено межвездное пространство.

§66 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ВАКУУМЕ

Вакуум — это разреженный до такой степени газ, что средняя длина свободного пробега молекул превышает линейные размеры сосуда.

В вакууме практически отсутствуют свободные носители заряда, поэтому ток в вакууме возможен только благодаря заряженным частицам, возникающие при эмиссионных явлениях.

Электронная эмиссия — явление испускания электронов из твердых тел или жидкостей: положительные ионы, разогнанные электрическим полем, бомбардируют катод и выбивают с поверхности новые электроны.

Виды электронной эмиссии

1. *Термоэлектронная эмиссия* — излучение электронов твердыми и жидкими телами при их нагревании. Вылетают электроны, кинетическая энергия E_k которых больше или равна работе выхода $A_{вых}$ их из металла (работе на преодоление связи электрона с металлом):

$$E_k \geqslant A_{вых}, \text{ или } \frac{m_e v^2}{2} \geqslant A_{вых}$$

2. *Фотоэлектронная эмиссия* — излучение электронов с поверхности тела под действием света.
3. *Автоэлектронная эмиссия* обусловлена наличием около поверхности тела сильного электрического поля, которое «вырывает» электроны из металла.

4. *Вторичная электронная и ионно-электронная эмиссии* — излучение электронов с поверхности тела в результате его бомбардировки электронами или ионами соответственно.
5. *Взрывная электронная эмиссия* — эмиссия электронов вследствие перехода микроскопических участков катода в плазму (локальный взрыв).

Электрический ток в вакууме представляет собой направленное движение свободных электронов, полученных в результате электронной эмиссии.

Вакуумный (ламповый) диод — устройство с односторонней проводимостью, действие которого основано на электрическом токе в вакууме (рис. 137).

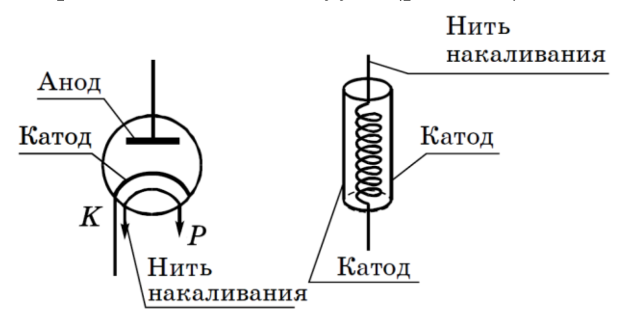


Рис. 137

Диод состоит из стеклянного баллона, из которого откачан воздух и встроенно два электрода: катод (горячий электрод) и анод (холодный электрод). Если потенциал катода меньше, чем потенциал анода (рис. 138, *а*), то термоэлектроны, вылетающие из раскаленного катода, ускоряются электрическим полем $\vec{E}$, достигают анода и замыкают цепь. Если потенциал катода больше, чем потенциал анода (рис. 138, *б*), то термоэлектроны задерживаются электрическим полем $\vec{E}$, и ток в цепи не идет. Значит, вакуумный диод пропускает ток только в одном направлении.

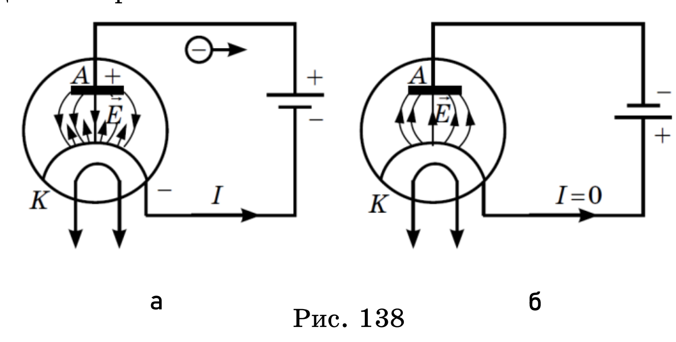


Рис. 138

Вольт-амперная характеристика лампового диода является нелинейной (рис. 139, *а*). Ток насыщения достигается тогда, когда все электроны, выпущенные катодом, переносятся к аноду.

Если нить накаливания покрыть слоем оксидов щелочных металлов с небольшой работой выхода, то ток насыщения практически не достигается, а вольт-амперная характеристика имеет вид, как на рис. 139, *б*.

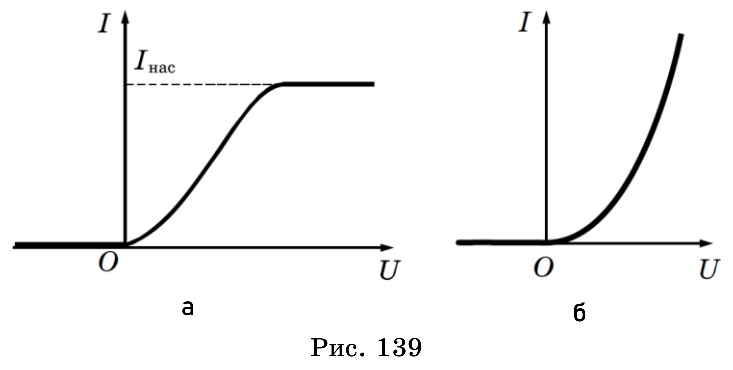


Рис. 139

Если в аноде лампового диода сделать отверстие, то часть электронов, ускоренных электрическим полем, влетит в это отверстие и создаст за анодом **электронный пучок** — поток электронов, которые быстро двигаются.

Свойства электронных пучков

1. Вызывают нагрев тел в случае попадания на их поверхность.
2. Вызывают появление рентгеновского излучения в случае быстрого торможения.
3. Вызывают свечение некоторых веществ и материалов (люминофоров).
4. Отклоняются электрическим и магнитным полями.

Электронно-лучевая трубка — вакуумное устройство с управляемым электронным пучком и специальным экраном, который светится в местах попадания электронов (рис. 140). Электронно-лучевая трубка долгое время была основным элементом ***осциллографа*** — *устройства для исследования обменных процессов в электрических цепях*.

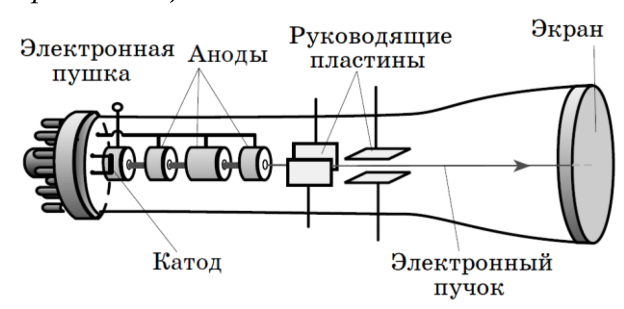


Рис. 140

Электронно-лучевая трубка представляет собой вакуумный баллон, одна из стенок которого служит экраном. Экран покрыт слоем *люминофора* — вещества, которое светится, когда на него попадает пучок электронов. На противоположном от экрана конце трубки расположена электронная пушка, предназначенная для формирования электронного пучка. Электронная пушка состоит из подогревного катода и анода. Форма катода и анода подобранная таким образом, что электроны, покидающие катод, разгоняются до больших скоростей и фокусируются на экране почти в точку. На пути электронного пучка с помощью руководящих пластин создается электрическое (или магнитное) поле.

Электронный пучок попадает в электрическое поле руководящих пластин (или электромагнитов). Если напряжение подается на вертикальные пластины, то пучок отклоняется по горизонтали, если горизонтальные — то по вертикали. Таким образом, подавая различное напряжение, можно управлять электронным пучком.

§67 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Полупроводники за своей проводимостью занимают промежуточное место между проводниками и диэлектриками:

- *проводники* — $\rho \sim 10^{-8}$ Ом · м;
- *полупроводники* — $\rho \sim 10^{-4} - 10^{7}$ Ом · м;
- *диэлектрики* — $\rho \sim 10^{12} - 10^{20}$ Ом · м.

Свойства полупроводников

1. В отличие от металлических проводников удельное сопротивление полупроводников обычно уменьшается с повышением температуры (рис. 141).

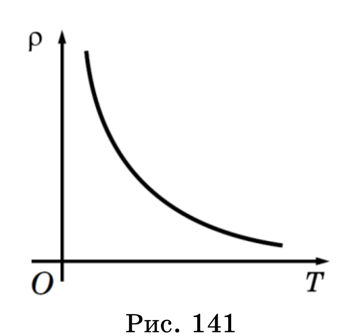


Рис. 141

2. Удельное сопротивление большинства полупроводников уменьшается с увеличением освещенности.
3. Резко уменьшить удельное сопротивление полупроводников может введение примесей.

Проводимость полупроводников, обусловленную наличием в них свободных электронов, называют **электронной проводимостью**.

В чистых полупроводниках между атомами действует ковалентная связь. Каждый атом обменивается валентными электронами с четырьмя соседними. При тепловых соударениях атомов какой-то из электронов, получив энергию, может покинуть связь с атомом — образуется свободный электрон, а отсутствие межатомной связи называется «**дырка**», которая эквивалентна положительному заряду (рис. 142).

При комнатной температуре концентрация свободных электронов и дырок в чистых полупроводниках мала.

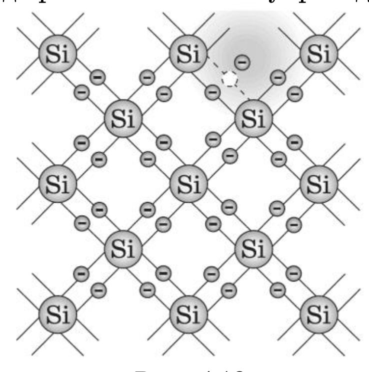


Рис. 142

Проводимость полупроводников, обусловленную перемещением дырок, называют **дырочной проводимостью**.

В чистом полупроводнике электрический ток создает одинаковое количество свободных электронов и дырок. Такую проводимость называют **собственной проводимостью полупроводников**.

Электрический ток в полупроводниках представляет собой направленное движение свободных электронов и дырок.

Применение чистых полупроводников

Термисторы (терморезисторы) — полупроводники, которые резко меняют сопротивление при изменении температуры, используются как термометры и термореле.

Фоторезисторы — полупроводники, которые резко меняют сопротивление при освещении, используются для измерения освещенности (люксометры) и в фотореле (рис. 143).

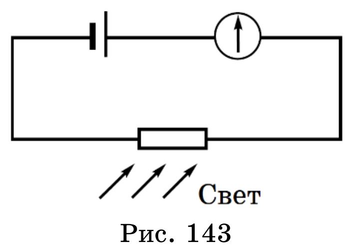
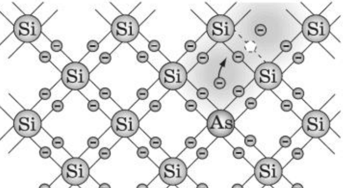
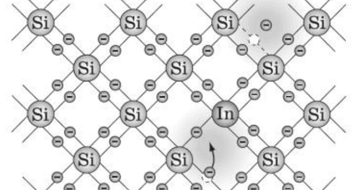


Рис. 143

В чистых полупроводниках электрический ток создает одинаковое количество свободных электронов и дырок (электронно-дырочная проводимость). Если к чистому проводнику добавить малый процент примеси, то механизм проводимости изменится.

ПРИМЕСНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ	
Донорные примеси	**Акцепторные примеси**
Если к четырехвалентному силицию добавляют небольшое количество пятивалентного Арсена, то четыре валентных электрона Арсена образуют парные электронные связи с атомами Силиция. Пятому валентному электрону связи «не хватает», поэтому он легко покидает свой атом — образуется свободный электрон, а примесный атом становится положительным ионом, закрепленным в узле кристаллической решетки.	При наличии в четырехвалентном полупроводнике трехвалентной примеси, например Индия, атом примеси захватывает с атома основного полупроводника валентный электрон, тем самым пополняя недостаточную ковалентную связь. При этом он становится отрицательным ионом, закрепленным в узле кристаллической решетки, а в основном полупроводнике образуется подвижная дырка.
	
Примеси, атомы которых относительно легко отдают электроны, называют **донорными примесями** («дающий»). *В полупроводниках с донорными примесями концентрация свободных электронов значительно выше, чем концентрация дырок.* Полупроводники с преимущественно электронной проводимостью называют **полупроводниками *n*-типа** (отрицательный).	Примеси, атомы которых «заимствуют» электроны, называют **акцепторными примесями** («принимающий»). *В полупроводниках с акцепторными примесями основные носители тока — дырки.* Полупроводники с преимущественно дырочной проводимостью называют **полупроводниками *p*-типа** (положительный).

Электронно-дырочный переход (p-n-переход) — это участок контакта двух полупроводников с разными типами проводимости — дырочной (полупроводник *p*-типа) и электронной (полупроводник *n*-типа).

В контакте полупроводников *p*- и *n*-типа происходит взаимная диффузия электронов и дырок и их нейтрализация, вследствие чего возникает запорный слой. В запорном слое создается электрическое поле $\vec{E}_0$, направленное от *n* к *p*, и контактная разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ (рис. 144).

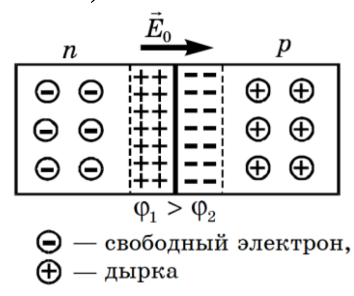


Рис. 144

Если создать поле $\vec{E}$, направленное от *p*- к *n*-типу полупроводника, то запорной слой ликвидируется, сопротивление уменьшается, ток увеличивается (рис. 145).

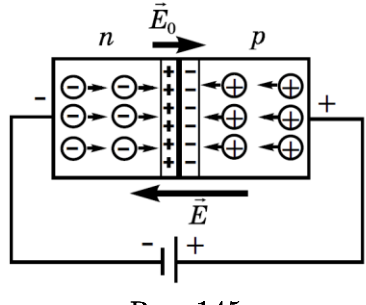


Рис. 145

Если создать поле $\vec{E}$, направленное от *n*- к *p*-типу полупроводника, то запорный слой увеличивается, сопротивление увеличивается, сила тока уменьшается (рис. 146).

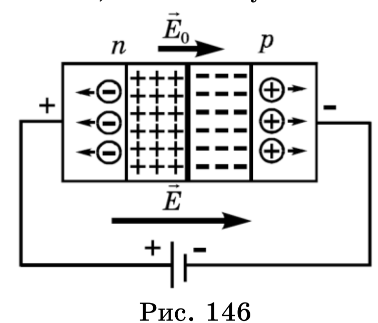


Рис. 146

Полупроводниковое устройство, во внутреннем строении которого сформирован один *p*-*n*-переход, называют **полупроводниковым диодом**.

Полупроводниковый диод на электрических схемах обозначают так:



Диод в цепи переменного тока действует как выпрямитель: пропускается ток только в одном направлении (рис. 147, *а*, *б*).

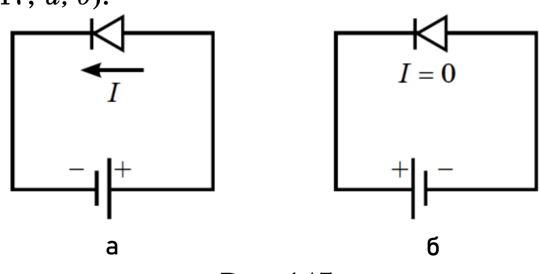


Рис. 147

Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода показана на рис. 148.

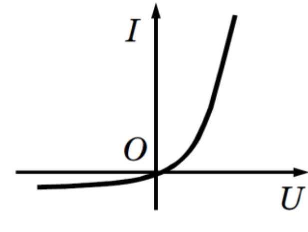


Рис. 148

Полупроводниковый триод (транзистор) — устройство с *p*-*n*-*p*- или *n*-*p*-*n*-переходом (*p*-*n*-*p*-транзистор, рис. 149).

Если в эмиттере и коллекторе дырок существенно больше, чем электронов (эти участки имеют проводимость *p*-типа), а в базе больше электронов (проводимость *n*-типа) — это транзистор *p*-*n*-*p*-типа. Если в эмиттере и коллекторе электронов больше, чем дырок, а в базе больше электронов — это транзистор *n*-*p*-*n*-типа.

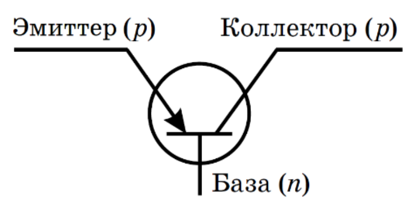


Рис. 149

Полупроводниковые элементы (диоды, транзисторы) являются главной частью современных электронных устройств (от калькулятора или компьютера до систем управления спутниками).

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

§68 МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Магнитное поле — это форма материи (составляющая электромагнитного поля), которая существует около намагниченных тел, проводников с током, движущихся заряженных тел и частиц и действует на другие намагниченные тела, проводники с током, движущиеся заряженные тела и частицы, расположенные в этом поле.

Магнитное поле — это вид материи, благодаря которой осуществляется магнитное взаимодействие.

Магнитное поле является материальным.

Магнитное поле создают:

- намагниченные тела;
- проводники с током;
- движущиеся заряженные частицы и тела;
- переменное электрическое поле.

Магнитное поле действует с некоторой силой на:

- заряженные тела и частицы, движущиеся в этом поле;
- проводники с током;
- намагниченные тела.

Магнитное поле действует на любое вещество, намагничивая ее определенным образом.

Постоянные магниты — тела, которые длительное время сохраняют магнитные свойства.

Основные свойства постоянных магнитов

1. Магнитное действие магнита на разных участках его поверхности — разное; участки, где магнитное действие проявляется сильнее всего, называют *полюсами магнита*.
2. Магнит имеет два полюса — *северный* N и *южный* S.
3. Одноименные полюсы магнитов отталкиваются, разноименные — притягиваются.
4. При нагревании постоянного магнита до определенной температуры, которую называют *точкой Кюри*, его магнитные свойства исчезают.

Проявление магнитного взаимодействия

- *Взаимодействие постоянных магнитов*. Планета Земля — постоянный магнит, северный полюс которого находится вблизи южного географического полюса, а южный — вблизи северного, поэтому северный конец магнитной стрелки всегда указывает на север, то есть на южный магнитный полюс Земли. Первые исследования земного магнетизма провел английский физик и врач *В. Гильберт* в конце XVI в.
- *Взаимодействие магнитной стрелки и проводника с током* (рис. 150, *а*): проводник с током вызывает на магнитную стрелку ориентировочное действие. Этот факт впервые опытным путем установил датский физик *Г. К. Эрстед* в 1820 г.
- *Взаимодействие двух параллельных проводников с током* (рис. 150, *б*): проводники, в которых текут токи одного направления притягиваются, противоположного направления — отталкиваются. Опыты по изучению взаимодействия проводников с током, а также двух ведущих катушек с током впервые провел французский физик *А. Ампер* в 1820 г. Ампер также выдвинул гипотезу о том, что взаимодействие постоянных магнитов обусловлена незатухающими молекулярными токами в их середине. Но гипотеза Ампера только частично объясняет магнитные свойства вещества.

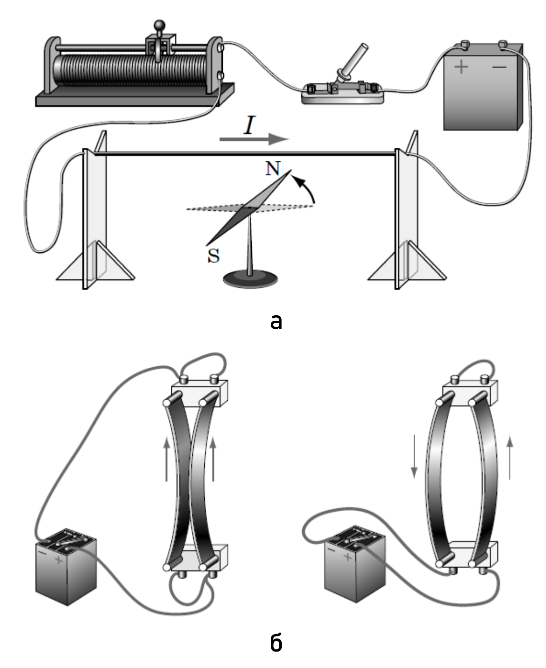


Рис. 150

Магнитная индукция (индукция магнитного поля) $\vec{B}$ — это векторная физическая величина, характеризующая силовое действие магнитного поля.

Модуль магнитной индукции B равен отношению максимальной силы $F_{\text{А max}}$, с которой магнитное поле действует на проводник с постоянным током (сила Ампера), к величине силы тока I и длины l активной части проводника (рис. 151, *а*) или равен отношению максимальной силы $F_{\text{Л max}}$, с которой магнитное поле действует на движущийся положительный заряд (сила Лоренца), к величине q этого заряда и скорости v его движения (рис. 151, *б*)[16]:

$$B = \frac{F_{\text{А max}}}{Il} \quad \text{или} \quad B = \frac{F_{\text{Л max}}}{qv}$$

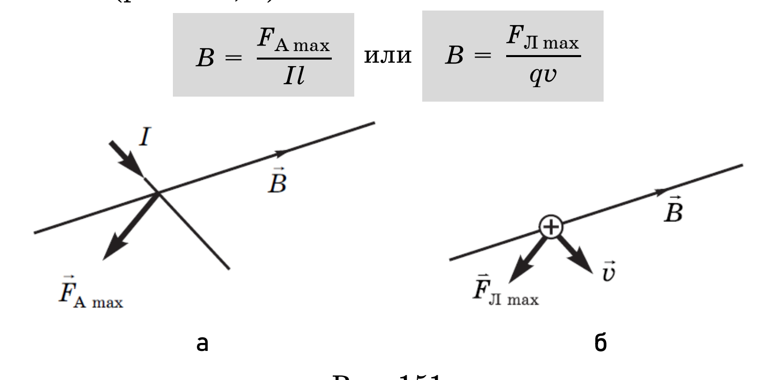


Рис. 151

Единица магнитной индукции в СИ — **тесла** (Тл).

1 тесла — это магнитная индукция такого однородного магнитного поля, которое действует с максимальной силой 1 ньютон на проводник длиной 1 метр, сила тока в котором 1 ампер:

$$\text{Тл} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

За направление вектора магнитной индукции в данной точке магнитного поля принято направление, на которое указывает северный полюс магнитной стрелки, установленной в этой точке.

16 Также модуль магнитной индукции равен отношению максимального момента сил $M_{\max}$, которыми магнитное поле вращает рамку с постоянным током, к силе тока I в рамке и площади S, ограниченной рамкой:

$$B = \frac{M_{\max}}{IS}.$$

Направление вектора магнитной индукции магнитного поля проводника с током и катушки с током определяют с помощью **правила буравчика** или с помощью **правой руки**: если направить большой палец правой руки за направлением тока в проводнике, то четыре согнутых пальца укажут направление линий магнитной индукции магнитного поля тока (рис. 152, *а*); если четыре согнутых пальца правой руки направить за направлением тока в катушке, то отогнутый на 90° большой палец укажет направление линий магнитной индукции магнитного поля внутри катушки (рис. 152, *б*).

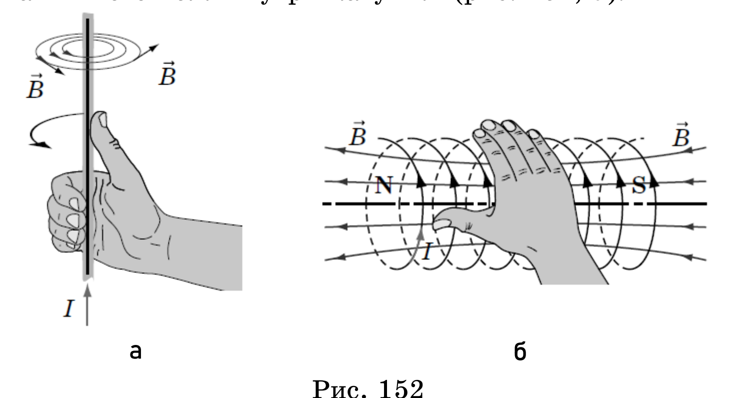


Рис. 152

Линии магнитной индукции — условные линии, в каждой точке которой касательная совпадает с линией, вдоль которой направлен вектор магнитной индукции (рис. 153, *а*).

Линии магнитной индукции всегда замкнуты: магнитное поле — это **вихревое поле**.

Линии магнитной индукции выходят из северного полюса катушки с током или постоянного магнита и входят в южный (рис. 153, *б*).

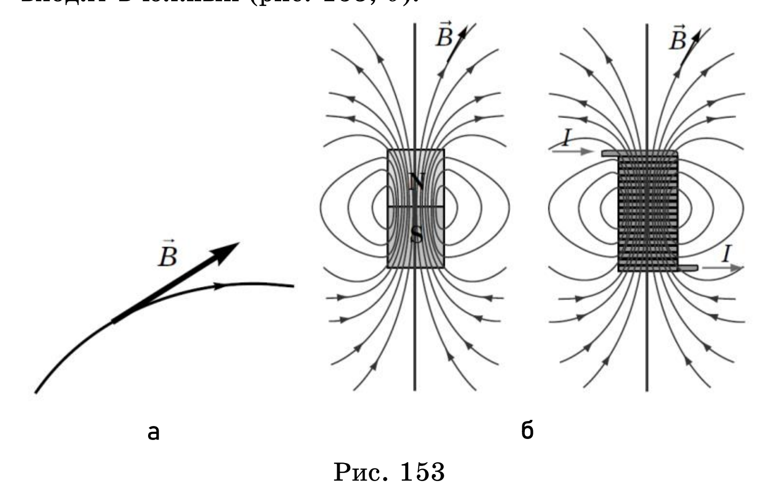


Рис. 153

Магнитное поле в определенном участке пространства является **однородным**, если в каждой точке участка векторы магнитной индукции одинаковы как по модулю, так и по направлению.

В общем случае магнитное поле **неоднородно** — в разных его точках векторы магнитной индукции имеют разные значения и направления, поэтому линии магнитной индукции обычно искривлены, а их плотность разная.

§69 СИЛА АМПЕРА И СИЛА ЛОРЕНЦА

Сила Ампера — это сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током.

Сила Ампера зависит от ориентации проводника относительно вектора магнитной индукции: магнитное поле не влияет на проводник с током, ось которого параллельна линиям магнитной индукции, однако сила Ампера максимальна в случае, когда ось проводника перпендикулярна к линиям магнитной индукции. То есть *модуль силы Ампера зависит только от проекции вектора магнитной индукции на ось, перпендикулярную оси проводника*. Если проводник прямолинейный, а магнитное поле, в котором он находится, однородное, то модуль силы Ампера определяется по формуле*:

$$F_\text{A} = BIl\sin\alpha,$$

где B — магнитная индукция поля, в котором находится проводник; I — сила тока в проводнике; l — длина активной части проводника (длина части проводника, которая находится в поле); α — угол между вектором магнитной индукции и направлением тока.

Направление силы Ампера определяется по **правилу левой руки** (рис. 154): если левую руку расположить так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали направление тока в проводнике, то отогнутый на 90° большой палец укажет направление силы Ампера.

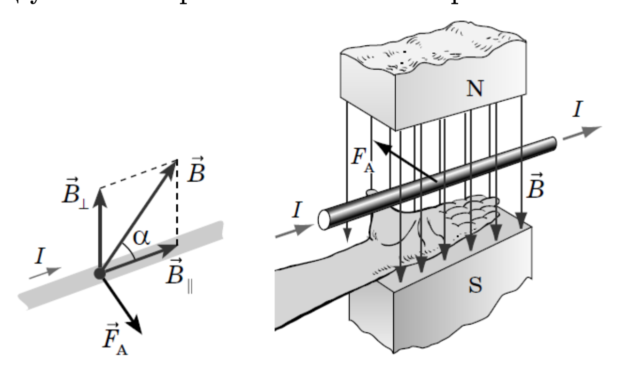


Рис. 154

Момент сил Ампера M, действующих на плоский замкнутый контур, расположенный в однородном магнитном поле, равен произведению модуля магнитной индукции B поля, силы тока I в контуре, площади S контура и синуса угла α между вектором магнитной индукции и нормалью к плоскости контура[17]:

$$M = BIS\sin\alpha$$

Если рамка содержит N витков провода, вращающий момент рассчитывается по формуле:

$$M = NBIS\sin\alpha.$$

На вращении рамки с током в магнитном поле основывается действие электрических двигателей и электроизмерительных приборов магнитоэлектрической системы.

Сила Лоренца — это сила, с которой магнитное поле действует на движущиеся заряженные частицы.

---

* Силу взаимодействия двух параллельных проводников с силами токов I_1 и I_2 и длиной l рассчитывают по формуле:

$$F = \mu\mu_0\frac{I_1 I_2 l}{2\pi R},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ (генри на метр) — магнитная постоянная; μ — относительная магнитная проницаемость среды; R — расстояние между проводниками.

17 Данную формулу можно записать так:

$$M = BIS\cos\alpha,$$

где α — угол между вектором магнитной индукции и плоскостью контура.

Сила Лоренца является производной от формулы силы Ампера:

$$F_Л = B|q|v\sin\alpha,$$

где q — заряд частицы; B — магнитная индукция поля, в котором движется частица; v — скорость движения частицы; α — угол между направлением движения частицы и направлением магнитной индукции магнитного поля.

Направление силы Лоренца определяется по **правилу левой руки:** если расположить левую руку так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, а направление четырех пальцев совпадало с направлением скорости движения положительно заряженной частицы (или был направлен противоположно направлению скорости движения отрицательно заряженной частицы), то отогнутый 90° большой палец укажет направление силы Лоренца (рис. 155).

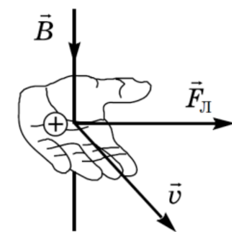


Рис. 155

Сила Лоренца $\vec{F}_Л$ направлена перпендикулярно скорости движения $\vec{v}$ заряда, поэтому:

- предоставляет заряженной частице центростремительного ускорения: $F_Л = ma_{цс}$.
- работа $\vec{F}_Л$ равна нулю, потому что она всегда перпендикулярна скорости частицы.

Частные случаи силы Лоренца

1. Если скорость движения частицы направлена вдоль линий индукции поля ($\vec{v} \parallel \vec{B}$) (рис. 156, *а*), значит, магнитное поле не действует на частицу, поэтому, если нет других сил, частица будет двигаться равномерно прямолинейно вдоль линий магнитной индукции ($F_Л = 0$, так как $\sin\alpha = 0$).
2. Если скорость движения частицы направлена перпендикулярно к линиям индукции поля ($\vec{v} \perp \vec{B}$) (рис. 156, *б*), значит, частица движется равномерно по окружности, а сила Лоренца оказывает частице центростремительного ускорения $\vec{a}_{цс}$ ($F_Л = B|q|v$, так как $\sin\alpha = 1$).

   Согласно второму закону Ньютона: $F_Л = ma_{цс}$, поэтому

   $$B|q|v = m\frac{v^2}{R}.$$

   Отсюда радиус R траектории движения частицы и период T ее вращения определяются по формулам:

   $$R = \frac{mv}{B|q|};\ T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{B|q|}.$$

   Период вращения частицы не зависит от скорости ее движения и радиуса траектории.
3. Если скорость движения частицы $\vec{v}$ направлена под углом α к $\vec{B}$, значит, скорость ее движения можно разложить на *две составляющие* (рис. 156, *в*): первая составляющая $\vec{v}_\parallel$ параллельна линиям магнитной индукции поля, она обеспечивает движение частицы вдоль этих линий; вторая составляющая $\vec{v}_\perp$ перпендикулярна к линиям магнитной индукции поля, и поле заставляет частицу двигаться по окружности с периодом

   $$T = \frac{2\pi R}{v_\perp}.$$

Таким образом, *траектория движения частицы — винтовая линия*, шаг h (расстояние между соседними витками) которой определяется составляющей $\vec{v}_\parallel$: $h = v_\parallel T$, а радиус витка — составляющей $v_\perp$: $R = \frac{mv_\perp}{B|q|}$.

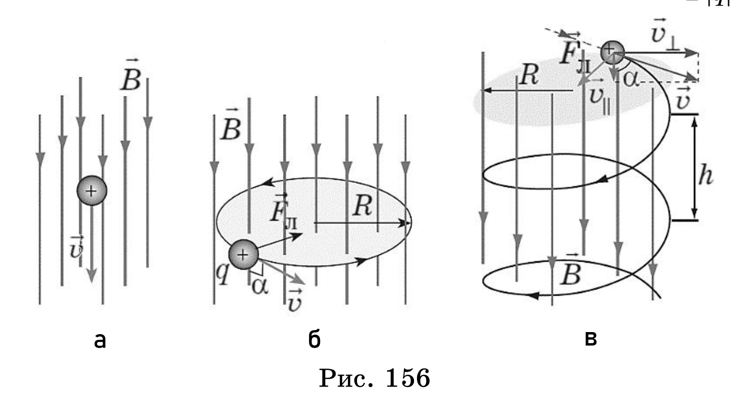


Рис. 156

Тот факт, что период вращения частицы в магнитном поле не зависит от скорости ее движения и радиуса траектории, используют в ***циклотронах*** — *ускорителях тяжелых частиц* (протонов, ионов). На движении заряженной частицы однородного магнитного поля базируется действие ***масс-спектрометров*** — *устройств, с помощью которых можно измерять массы заряженных частиц.*

§70 ОПЫТЫ М. ФАРАДЕЯ. ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

После многочисленных опытов, которые проводил английский физик *М. Фарадей* с целью «превратить магнетизм в электричество» в течение десяти лет, он заметил, что в замкнутом проводнике, расположенном в переменном магнитном поле, возникает электрический ток, — его ученый назвал *индукционным (приведенным) током.*

Опираясь на опыты Фарадея, ток возникает, если:

- двигать магнит относительно катушки, которая замкнута на гальванометр, или катушку относительно магнита (рис. 157, *а*);
- вращать катушку относительно магнита;
- сжимать катушку, меняя площадь контура;
- двигать катушку *2* относительно катушки *1*, которая служит электромагнитом (рис. 157, *б*);
- замыкать и размыкать цепь катушки *1*;
- изменять силу тока в катушке *1*;
- вводить и выводить сердечник.

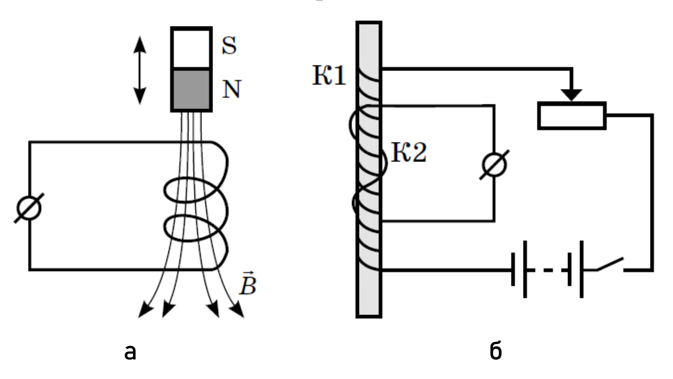


Рис. 157

Поток магнитной индукции (магнитный поток) Φ — это физическая величина, характеризующая распределение магнитного поля по поверхности, ограниченной замкнутым контуром, и численно равна произведению магнитной индукции B на площадь S поверхности и на косинус угла α между вектором магнитной индукции и нормалью к поверхности (рис. 158):

$$\Phi = BS\cos\alpha$$

Единица магнитного потока в СИ — **вебер** (Вб).

1 Вб — это максимальный магнитный поток, создаваемый магнитным полем индукцией 1 Тл через поверхность площадью 1 м^2 (Вб = Тл · м^2).

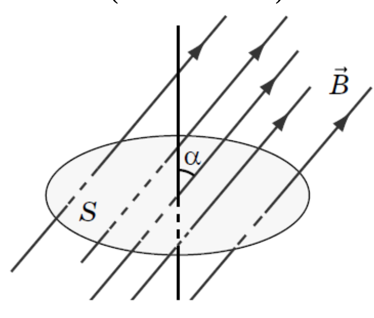


Рис. 158

Общие закономерности в опытах Фарадея

1. Электрический ток в замкнутом проводящем контуре индуцируется только тогда, когда меняется магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром.
2. Чем быстрее меняется магнитный поток, тем больше сила индукционного тока в контуре.
3. Направление индукционного тока в контуре зависит от того, увеличивается или уменьшается магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром.

При изменении магнитного потока, пронизывающего контур, в контуре возникают сторонние (не кулоновские) силы, которые перемещают по контуру электрический заряд q, выполняя при этом работу.

Работу сторонних сил $A_{ст}$ по перемещению единичного положительного заряда называют **электродвижущей силой (ЭДС индукции) индукции** $\mathscr{E}_i$:

$$\mathscr{E}_i = \frac{A_{ст}}{q}$$

Электромагнитная индукция — это явление возникновения ЭДС индукции в проводнике, контур которого пересекается переменным магнитным потоком.

Если проводник замкнут, то в контуре возникает индукционный ток I_i:

$$I_i = \frac{\mathscr{E}_i}{R},$$

где R — сопротивление проводника.

Если проводник разомкнут, то на концах проводника возникает разность потенциалов:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U = \mathscr{E}_i.$$

Закон электромагнитной индукции (закон Фарадея): электродвижущая сила индукции $\mathscr{E}_i$ равна скорости изменения магнитного потока $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, пронизывающего поверхность, ограниченную контуром:

$$\mathscr{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Знак «–» отображает *правило Ленца*.

Если магнитный поток изменяется неравномерно, следует рассматривать его изменение за короткий интервал времени $\Delta t \to 0$; в таком случае закон электромагнитной индукции приобретает вид:

$$\mathscr{E}_i = -\Phi'(t)$$

Если контур содержит N витков провода, то ЭДС индукции равна:

$$\mathscr{E}_i = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -N\Phi'(t).$$

Направление индукционного тока зависит от того, увеличивается или уменьшается магнитный поток. Эту зависимость впервые установил российский ученый *Э. Х. Ленц*, он же сформулировал правило, которое носит его имя.

Правило Ленца: индукционный ток I_i, который возникает в замкнутом проводящем контуре, имеет такое направление, что созданный этим током магнитный поток противодействует изменению магнитного потока, который вызвал появление индукционного тока (рис. 159).

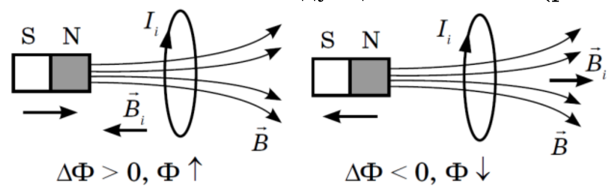


Рис. 159

Правило Ленца выражает закон сохранения энергии. На создание индукционного тока нужна энергия, следовательно, должна быть выполнена дополнительная работа внешних сил. Например, при приближении магнита к контуру или удалении от него всегда возникает сила, препятствующая движению (приближаем — созданное индукционным током магнитное поле отталкивает магнит, отдаляем — притягивает). Чтобы преодолеть это противодействие, и выполняется работа.

Причины возникновения ЭДС индукции

1. *Проводник движется в магнитном поле:* на свободные носители зарядов внутри проводника действует сила Лоренца $\vec{F}_Л$, под действием которой заряды движутся вдоль проводника, в результате чего на одном конце проводника создается отрицательный заряд, а на другом — положительный.

ЭДС индукции рассчитывается по формуле:

$$\mathscr{E}_i = Bvl\sin\alpha,$$

где B — магнитная индукция поля, v — скорость движения проводника, l — длина проводника, α — угол между направлением движения проводника и направлением магнитного поля.

Если проводник замкнут, то в нем возникает ток. В самом проводнике действуют сторонние силы (сила Лоренца), в проводнике, который соединяет — кулоновские. Направление в проводнике совпадает с направлением силы Лоренца, действующей на положительный заряд (рис. 160).

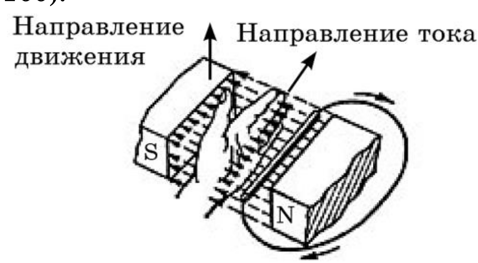


Рис. 160

2. *Проводник неподвижен, а магнитное поле меняется:* сторонние силы имеют электрическую природу, ведь переменное магнитное поле всегда сопровождается появлением **вихревого электрического поля**.

Направление напряженности вихревого поля определяется:

- с помощью правила левой руки, если магнитная индукция увеличивается (рис. 161, *а*)
- с помощью правила правой руки, если магнитная индукция уменьшается (рис. 161, *б*).

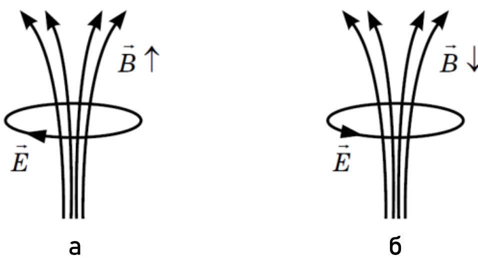


Рис. 161

Особенности вихревого электрического поля

1. Создается не электрическими зарядами, а переменным магнитным полем.
2. Линии напряженности поля замкнуты.
3. Работа вихревого электрического поля на замкнутой траектории *не* равна нулю.

Если в переменном магнитном поле расположить замкнутый проводник, то в нем возникнет индукционный ток.

Индукционный ток возникнет и тогда, когда проводник не замкнутый, но массивный. В этом случае индукционные токи возникают по определенным замкнутым контурам внутри проводника. Эти токи называют **токами Фуко**, которые вызывают нагрев проводника.

Для ослабления токов Фуко сердечник генераторов, трансформаторов и т. д. изготавливают из тонких изолированных пластин, которые располагают перпендикулярно к возможному возникновению вихревых токов.

Вихревые токи Фуко используют в индукционных печах для нагрева и плавления металлов.

§71 САМОИНДУКЦИЯ. ИНДУКТИВНОСТЬ. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Если в проводнике сила тока увеличивается (при замыкании цепи), значит, переменное магнитное поле создает *вихревое электрическое поле*, которое согласно правилу Ленца *противодействует увеличению тока*, поэтому сила тока в цепи катушки (а следовательно, и в лампе 2) будет увеличиваться не сразу, а постепенно, причем лампочка 1 вспыхнет практически сразу, а лампочка 2 — с заметным опозданием (рис. 162).

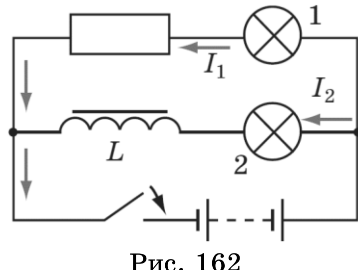


Рис. 162

Если в проводнике сила тока уменьшается (при размыкании цепи), значит, переменное магнитное поле создает *вихревое электрическое поле*, которое согласно правилу Ленца *будет поддерживать ток* в катушке, поэтому ток в цепи катушки исчезает не сразу, а уменьшается постепенно и обе лампы гаснут одновременно (рис. 163).

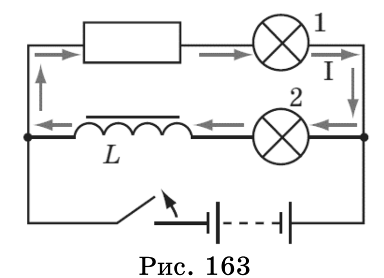


Рис. 163

Явление самоиндукции — явление возникновения вихревого электрического поля в проводнике, в котором течет переменный электрический ток.

Электродвижущую силу индукции, которая создается в проводнике вследствие изменения его собственного магнитного поля, называют **электродвижущей силой самоиндукции** $\mathscr{E}_{is}$.

Явление самоиндукции — это частный случай явления электромагнитной индукции. Согласно закону Фарадея ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока:

$$\mathscr{E}_{is} = \mathscr{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\Phi'(t).$$

Магнитный поток прямо пропорционален силе тока в проводнике:

$$\Phi = LI,$$

где L — коэффициент пропорциональности.

Закон самоиндукции: электродвижущая сила самоиндукции $\mathscr{E}_{is}$ прямо пропорциональна скорости изменения силы тока в проводнике:

$$\mathscr{E}_{is} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}, \text{ или } \mathscr{E}_{is} = -LI'(t)$$

Здесь коэффициент пропорциональности L называют *индуктивностью проводника*, $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ — скорость изменения силы тока.

Индуктивность L — физическая величина, характеризующая проводник и численно равная ЭДС самоиндукции, возникающая в проводнике при изменении силы тока на 1 ампер за 1 секунду:

$$L = \frac{|\mathscr{E}_{is}|}{|\Delta I|/\Delta t}$$

Единица индуктивности в СИ — **генри** (Гн).

Индуктивность проводника равна 1 генри, если в нем возникает ЭДС самоиндукции 1 В при изменении силы тока на 1 А за 1 с:

$$1\ \text{Гн} = 1\ \frac{\text{В}}{\text{А / с}} = 1\ \frac{\text{Вб}}{\text{А}}.$$

Индуктивность — это характеристика проводника, поэтому она не зависит ни от силы тока в проводнике, ни от ЭДС самоиндукции, возникающая в проводнике вследствие изменения тока.

Индуктивность зависит:

- от магнитных свойств среды, в которой расположен проводник;
- размеров и формы проводника;
- наличия и формы сердечника*.

* Например, индуктивность соленоида вычисляют по формуле:

$$L = \mu\mu_0\frac{N^2S}{l},$$

где μ — магнитная проницаемость материала, из которого изготовлен сердечник; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ — магнитная постоянная; N — количество витков в соленоиде; l и S — соответственно длина и площадь поперечного сечения соленоида.

Поскольку уже после отключения источника тока в проводнике определенное время существует ток, то можно утверждать, что магнитное поле имеет энергию. Эту энергию проводник накапливает сразу после замыкания цепи.

Энергия магнитного поля $W_м$ проводника с током равна половине произведения индуктивности L проводника на квадрат силы тока I в проводнике:

$$W_м = \frac{LI^2}{2}$$

§72 МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ. ДИА-, ПАРА- И ФЕРРОМАГНЕТИКИ

Любое вещество, помещенное во *внешнее магнитное поле*, намагничивается, создавая *собственное магнитное поле*, которое в одних веществах направлено так же, как и внешнее магнитное поле, а в других — противоположно внешнему полю. Значит, *вещества могут как усиливать, так и ослаблять внешнее магнитное поле*.

В начале XIX века французский физик *Ампер высказал гипотезу*: магнитные свойства любого тела определяются электрическими токами внутри этого тела.

Относительная магнитная проницаемость среды μ — физическая величина, характеризующая магнитные свойства вещества и равная отношению магнитной индукции B магнитного поля в веществе к магнитной индукции B_0 магнитного поля в вакууме:

$$\mu = \frac{B}{B_0}$$

Одна из основных свойств частиц, из которых состоит атом, — наличие в них *собственного магнитного поля*. Это поле характеризует физическая величина, которую называют собственным *магнитным моментом*.

Магнитный момент $\vec{p}_m$ — это векторная физическая величина, численно равная произведению силы тока I, который течет по контуру, на площадь S контура[18]:

$$p_m = IS$$

Единица магнитного момента в СИ — **ампер-метр квадратный** ($А \cdot м^2$).

Направление вектора магнитного момента определяется с помощью ***правилу правой руки*** (или с помощью ***правила буравчика***).

Частицы, которые входят в состав атома (электроны, протоны, нейтроны) имеют *собственные магнитные поля* (*собственные магнитные моменты* p_m), наибольшие магнитные моменты имеют электроны. Эти поля *не* обусловлены наличием тока, а *являются характеристикой частицы*. Накладываясь, собственные магнитные поля частиц создают *собственное магнитное поле атома* (*собственный магнитный момент атома*).

Во внешнем магнитном поле:

- у всех атомов возникают приведенные магнитные моменты, которые создают в веществе магнитное поле, направленное против внешнего магнитного поля (рис. 164, *а*) — диамагнитный эффект;
- собственные магнитные моменты атомов ориентируются за направлением поля, создавая в веществе магнитное поле, которое совпадает по направлению с внешним полем, но этому препятствует тепловое движение атомов (рис. 164, *б*) — парамагнитный эффект.

[18] Для плоского контура с током.

Рис. 164

Магнетики — все вещества, которые способны намагничиваться во внешнем магнитном поле, то есть создавать собственные (внутренние) магнитные поля самого вещества.

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ			
Слабомагнитные вещества		**Сильномагнитные вещества**	
Незначительно изменяют внешнее магнитное поле		Усиливают внешнее магнитное поле	
Диамагнетики	**Парамагнетики**	**Ферромагнетики**	
$\mu \lesssim 1$	$\mu \gtrsim 1$	$\mu \gg 1$	
Принадлежат инертные газы, золото, медь, цинк, серебро, вода, молекулярный азот и др.	Принадлежит кислород, воздух, платина, алюминий, эбонит, вольфрам, магний, литий и др.	Принадлежит небольшая группа веществ: железо, никель, кобальт, редкоземельные вещества и ряд сплавов.	
Атомы и молекулы веществ не имеют собственных магнитных моментов	Атомы и молекулы веществ имеют собственные магнитные моменты	Ионы веществ имеют собственные магнитные моменты. Вещество состоит из **доменов** — макроскопических участков с линейными размерами 1–10 мкм, в которых собственные магнитные моменты соседних ионов сонаправлены (*домены имеют собственную намагниченность*)	
Относительная магнитная проницаемость не зависит от температуры	Относительная магнитная проницаемость уменьшается с увеличением температуры	При достижении определенной температуры — *температуры Кюри* — ферромагнитные свойства вещества исчезают, и оно становится парамагнетиком.	
Незначительно ослабляют внешнее магнитное поле	Незначительно усиливают внешнее магнитное поле	**Магнитожесткие:** сохраняют намагниченность длительное время	**Магнитомягкие:** легко намагничиваются и размагничиваются

Принцип суперпозиции магнитных полей: индукция результирующего магнитного поля в данной точке пространства равна векторной сумме индукций магнитных полей, созданных отдельными частицами, телами или полями:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + ... + \vec{B}_n$$

Магнитные поля не взаимодействуют, а только накладываются. Проводники с током и намагниченные тела взаимодействуют, поскольку магнитное поле одного тела действует на другое тело, и наоборот.

§73 ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Исследование явлений электромагнитной индукции приводит к выводу о том, что *переменное магнитное поле порождает вокруг себя вихревое электрическое*.

Электромагнитное поле — вид материи, посредством которого происходит взаимодействие между заряженными телами, заряженными частицами, намагниченными телами.

Условно принято, что электромагнитное поле имеет две составляющие (две формы проявления) — электрическую (электрическое поле), которая характеризуется влиянием поля как на движущиеся, так и на неподвижные заряженные частицы, и магнитную (магнитное поле), которая характеризуется влиянием только на движущиеся заряженные частицы.

Свойства электромагнитного поля

1. Непрерывность распределения в пространстве.
2. Дискретность структуры.
3. Способность распространяться в пространстве со скоростью, близкой к скорости света c:
$$c \approx 3 \cdot 10^8 \ \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$
4. Силовое действие на электрически заряженные частицы или тела, которое зависит от скорости их движения.

В 1867 г. британский физик *Дж. Максвелл* выдвинул гипотезу о том, что *электрическое и магнитное поля не существуют отдельно*, независимо друг от друга: магнитное поле, которое изменяется, создает электрическое поле, а электрическое поле, которое меняется, создает магнитное поле.

Теория электромагнитного поля (теория Максвелла) — это теория, устанавливающая связи между векторами, которые описывают электромагнитное поле, с одной стороны и источниками, и вихрями этих векторов с другой. Эти связи количественно выражает уравнение Максвелла.

На частицу, которая имеет заряд q и движется в электромагнитном поле со скоростью $\vec{v}$, действует *обобщенная сила Лоренца* $\vec{F}$, которую можно определить по формуле: $\vec{F} = \vec{F}_{эл} + \vec{F}_{Л}$, где $\vec{F}_{эл} = q\vec{E}$ — электрическая составляющая обобщенной силы Лоренца; $F_{Л} = B|q|v\sin\alpha$ — магнитная составляющая обобщенной силы Лоренца.

Источники вектора — объекты, на которых линии вектора начинаются или заканчиваются. **Вихри вектора** — объекты, вокруг которых линии вектора замыкаются.

В некоторых системах отсчета не обнаруживается магнитная или электрическая составляющая электромагнитного поля, и тогда поле соответственно называется электрическим или магнитным.

Вокруг заряженного шарика, находящегося в покое в системе «Земля» (источник $\vec{E}$), электромагнитное поле называется электрическим (нет вихрей $\vec{B}$) (рис. 165).

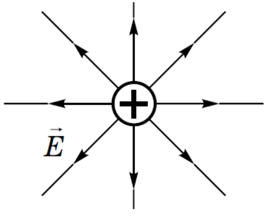


Рис. 165

Вокруг постоянного магнита, находящегося в покое в системе «Земля» (микротоки — вихри $\vec{B}$) электромагнитное поле называется магнитным полем (нет источников и вихрей $\vec{E}$) (рис. 166).

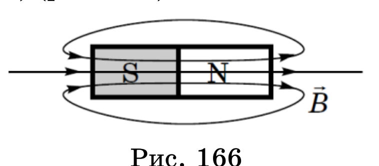


Рис. 166

В системе, которая движется относительно системы «Земля», поля $\vec{E}$ и $\vec{B}$ изменяются (вихри $\vec{B}$ и $\vec{E}$) — поле электромагнитное.

§74 СВОБОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ИДЕАЛЬНОМ КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

Электромагнитные колебания — это колебания электрического заряда (q), силы тока (i), напряжения (u), связанных с ними напряженности ($\vec{E}$) электрического поля и магнитной индукции ($\vec{B}$) магнитного поля, а также самостоятельные колебания напряженности и магнитной индукции в электромагнитной волне.

Возбудителями электромагнитных колебаний являются электрические заряды, движущиеся с ускорением, переменные электрические и переменные магнитные поля.

Свободные электромагнитные колебания возникают в *колебательном контуре*, в котором периодически меняется заряд и напряжение на пластинах конденсатора, а также сила тока в контуре.

Колебательный контур — это физический прибор, состоящий из последовательно соединенных конденсатора (*2*) и катушки индуктивности (*1*) (рис. 167).

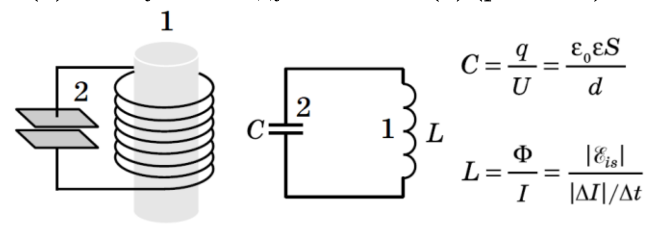


Рис. 167

Колебательный контур называют **идеальным**, если его сопротивление R равно нулю.

Механизм колебаний в идеальном колебательном контуре

При предоставлении конденсатору заряда q возникает электрическое поле $\vec{E}$, а на его пластинах — разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2 = U$ (рис. 168, *а*).

В катушке возникает ток, который увеличивается постепенно, поскольку его увеличению противодействует вихревое электрическое поле, возникающее вследствие увеличения магнитного потока катушки (рис. 168, *б*).

Ток возрастает, пока вся энергия электрического поля конденсатора не перейдет в энергию магнитного поля катушки (рис. 168, *в*).

С этого момента ток в цепи продолжает протекать в результате самоиндукции, перезаряжая конденсатор и создавая между его пластинами растущее электрическое поле, которое мешает протеканию тока (*г*).

Ток уменьшается постепенно, поскольку его поддерживает вихревое электрическое поле, возникающее вследствие уменьшения магнитного поля катушки. Ток прекращается, когда вся энергия магнитного поля катушки перейдет в энергию электрического поля конденсатора (рис. 168, *д*). Потом процесс повторяется (рис. 168, *е–и*).

Электромагнитные колебания в колебательном контуре являются *гармоническими*, поэтому заряд и напряжение на пластинах конденсатора и сила тока в катушке изменяется по закону синуса или косинуса.

Период T свободных колебаний в идеальном колебательном контуре определяется по ***формуле Томсона***:

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

где L — индуктивность катушки, C — емкость конденсатора.

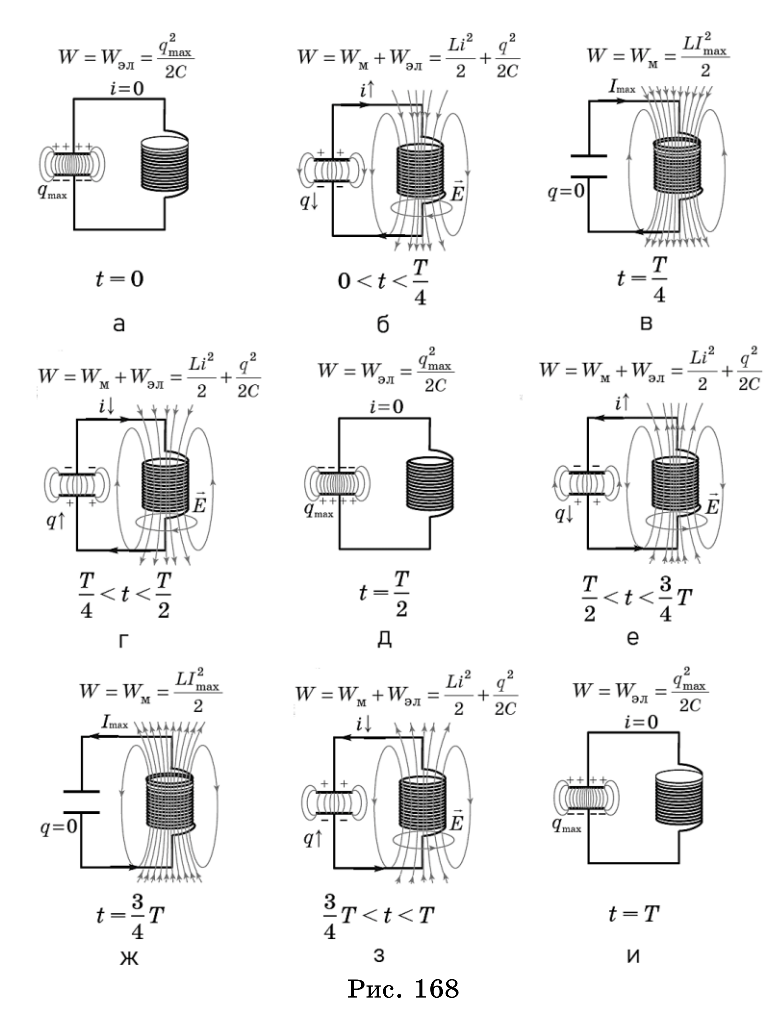


Рис. 168

Частота свободных колебаний:

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Циклическая частота свободных колебаний:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Если за начальный момент отсчета времени выбрать момент, когда заряд на пластинах конденсатора максимальный, то:

- уравнение колебаний заряда конденсатора (рис. 169, *а*):

$$q = q_{max}\cos\omega t,$$

где q_{max} — заряд, который предоставлен конденсатору, амплитуда колебаний заряда; ω — циклическая частота свободных колебаний;

- уравнение колебаний напряжения на пластинах конденсатора (рис. 169, *б*):

$$u = U_{max}\cos\omega t,$$

где $U_{max} = \frac{q_{max}}{C}$ — амплитуда колебаний напряжения;

- уравнение колебаний силы тока в контуре (рис. 169, *в*):

$$i = q'(t)$$

$$i = -I_{max}\sin\omega t \text{, или } i = I_{max}\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right),$$

где $I_{max} = q_{max}\omega$ — амплитуда колебаний силы тока.

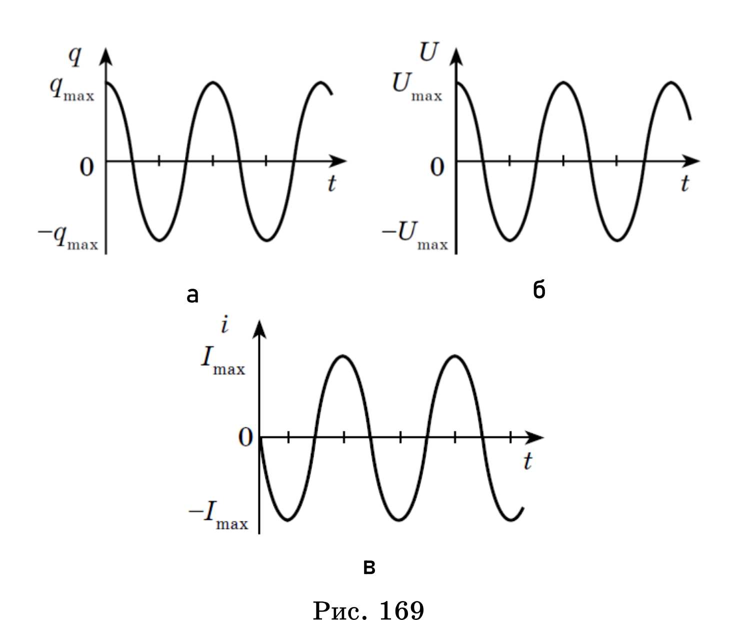


Рис. 169

Полная энергия $W_{полная}$ колебательного контура состоит из энергии электрического поля конденсатора ($W_{эл}$) и энергии магнитного поля катушки ($W_{м}$):

$$W_{полная} = W_{эл_{max}} = W_{м_{max}} = W_{эл} + W_{м}$$

В идеальном колебательном контуре электромагнитные колебания являются *незатухающими*, поэтому полная энергия сохраняется, при этом энергия электрического поля конденсатора периодически превращается в энергию магнитного поля катушки, и наоборот.

Дважды за период принимает максимальное значение энергия электрического и энергия магнитного поля.

§75 ВЫНУЖДЕННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ. ПЕРЕМЕННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Вынужденные электромагнитные колебания — это незатухающие гармонические колебания заряда, напряжения и силы тока, вызванные электродвижущей силой, периодически изменяющейся:

$$e = \mathscr{E}_{max} \sin \omega t,$$

где e — значение ЭДС в данный момент времени (мгновенное значение ЭДС); $\mathscr{E}_{max}$ — амплитудное значение ЭДС; ω — циклическая частота переменной ЭДС.

Переменный электрический ток — это электрический ток, сила которого изменяется по гармоническому закону:

$$i = I_{max} \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где i — мгновенное значение силы тока; I_{max} — амплитудное значение силы тока; ω — циклическая частота переменного тока, которая совпадает с частотой переменного ЭДС; φ_0 — сдвиг фаз между колебаниями тока и колебаниями ЭДС.

Генератор переменного тока — источник электрической энергии, в котором создается переменная ЭДС.

Генератором переменного тока может служить, например, проволочная рамка, которая вращается в однородном магнитном поле индукцией $\vec{B}$ с постоянной угловой скоростью ω (рис. 170, *а*).

Если рамку вращать в магнитном поле, то угол α между вектором магнитной индукции и нормалью к плоскости рамки будет меняться: $\alpha = \omega t$. Поэтому будет меняться и магнитный поток, пронизывающий рамку:

$$\Phi = BS\cos\alpha = BS\cos\omega t.$$

По закону Фарадея в рамке возникнет ЭДС индукции (рис. 170, *б*):

$$e = -N\Phi'(t) = NBS\omega \sin \omega t = \mathscr{E}_{max} \sin \omega t,$$

где $\mathscr{E}_{max} = NBS\omega$ — амплитудное значение ЭДС.

На концах рамки возникает синусоидальное напряжение, фаза колебаний которого совпадает с фазой колебаний ЭДС (см. рис. 170, *б*):

$$u = U_{max} \sin \omega t.$$

Если к проволочной рамке, которая вращается с помощью специальных контактов (щеток), подсоединить потребитель (например, лампу), то цепь будет замкнута и в ней возникнет электрический ток:

$$i = \frac{e}{R+r} = \frac{\mathscr{E}_{max} \sin \omega t}{R+r} = I_{max} \sin \omega t,$$

где R — сопротивление активной нагрузки; r — внутреннее сопротивление источника (рамки); $I_{max} = \frac{\mathscr{E}_{max}}{R+r}$ — амплитудное значение силы тока.

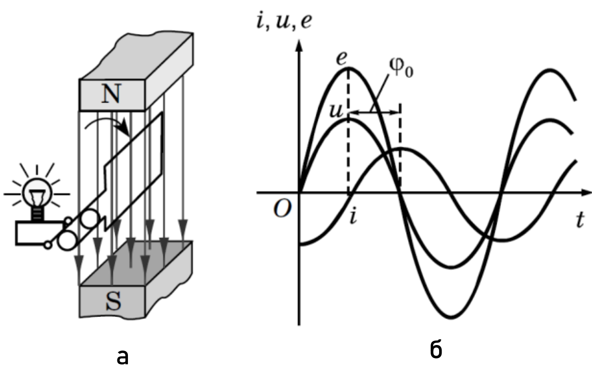


Рис. 170

Особенности промышленных генераторов переменного тока

В генераторах переменного тока вращается электромагнит (ротор), а рамка (обмотка) размещена в пазах статора, состоящий из отдельных пластин магнитомягкого ферромагнетика.

Скорость вращения ротора можно уменьшить, если использовать электромагнит, который имеет несколько пар магнитных полюсов. Частота ν переменного тока, который производит генератор, связана с вращающейся частотой n ротора генератора соотношением:

$$\nu = pn,$$

где p — количество пар магнитных полюсов генератора.

§76 СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В цепях переменного тока существуют различные виды сопротивлений, которые можно разделить на две группы — *активные сопротивления* и *реактивные сопротивления*.

Элемент электрической цепи имеет **активное сопротивление** R, если при прохождении в этом элементе тока часть электрической энергии тратится на нагрев: $Q = I^2Rt$ (рис. 171).

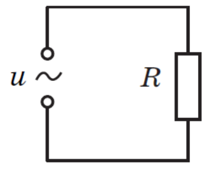


Рис. 171

В элементах электрической цепи, которые имеют только активное сопротивление, колебания силы тока и напряжения совпадают по фазе. Если $u = U_{max}\cos\omega t$, то $i = I_{max}\cos\omega t$.

Мощность переменного тока (средняя за период), которая выделяется на активном сопротивлении:

$$p = \frac{1}{2}U_{max}I_{max} = ui = i^2R = \frac{u^2}{R}.$$

Оценивать действие переменного тока с его мгновенным значением неудобно, он непрерывно меняется. Действие переменного тока принято оценивать по *действующему (эффективному) значению силы тока.*

Действующее значение силы переменного тока I равно силе такого постоянного тока, который в течение определенного времени выделяет в проводнике такое же количество теплоты, что и данный переменный ток:

$$I = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$$

Аналогично, **действующее значение напряжения** и **ЭДС** рассчитываются по формулам:

$$U = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}; \quad \mathscr{E} = \frac{\mathscr{E}_{max}}{\sqrt{2}}$$

Амперметры и вольтметры переменного тока измеряют именно действующие значения силы тока и напряжения.

Количество теплоты, выделяющейся в цепях переменного тока, рассчитывается по закону Джоуля — Ленца:

$$Q = I^2Rt,$$

где I — действующее значение силы тока.

Конденсатор и катушка индуктивности, введенные в цепь переменного тока, оказывают дополнительное сопротивление току. Это сопротивление называют **реактивным**, поскольку на его преодоление не тратится энергия источника питания.

Индуктивное сопротивление проводника X_L — физическая величина, характеризующая сопротивление проводника электрическому току, вызванный действием ЭДС самоиндукции (рис. 172, *а*):

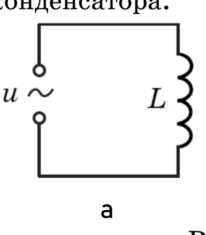
$$X_L = \omega L,$$

где ω — циклическая частота переменного тока; L — индуктивность проводника.

Емкостное сопротивление X_C — физическая величина, характеризующая способность конденсатора противодействовать переменному току (рис. 172, *б*):

$$X_C = \frac{1}{\omega C},$$

где ω — циклическая частота переменного тока; C — емкость конденсатора.



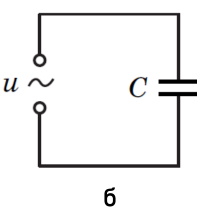


Рис. 172

Полное сопротивление (импеданс) цепи Z, которое содержит активное, индуктивное и емкостное сопротивления (рис. 173), при их *последовательном соединении* вычисляют по формуле*:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2},$$

где $X_L - X_C$ — **реактивное сопротивление.**

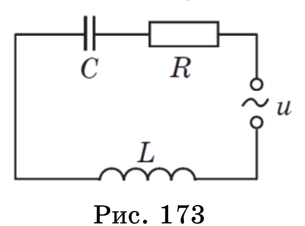


Рис. 173

Закон Ома для переменного тока: $I = \frac{U}{Z}$.

§77 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС

Электрический ток в цепи переменного тока — это вынужденные электромагнитные колебания.

Если в цепи последовательно соединенные емкость C, индуктивность L и активное сопротивление R, то может возникнуть *резонанс напряжений.*

Резонанс напряжений — это явление резкого увеличения амплитуды вынужденных колебаний силы тока в цепи в случае, когда частота изменения внешней ЭДС совпадает с частотой собственных колебаний цепи.

Резонанс токов — явление резкого уменьшения амплитуды вынужденных колебаний силы тока в случае, когда частота изменения внешней ЭДС совпадает с собственной частотой колебаний системы.

Условия возникновения электрического резонанса

1. Частота изменения внешней ЭДС совпадает с собственной частотой колебаний ν_0 электромагнитной колебательной системы: $\nu_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.
2. Индукционное сопротивление численно равно емкостному: $\omega L = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.
3. Активное сопротивление R системы должно быть невелико.

Чем больше активное сопротивление контура, тем слабее выражен скачок амплитуды колебаний силы тока. Если активное сопротивление R большое, то скачок амплитуды практически не наблюдается (рис. 174).

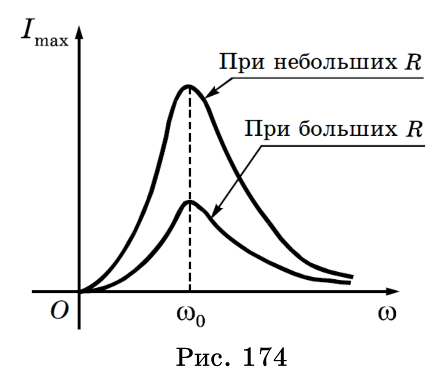


Рис. 174

* Если элементы соединены параллельно, то используется правило нахождения общего сопротивления при параллельном соединении: $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + ... + \frac{1}{R_n}$.

На явлении резонанса напряжений основывается техника радиоприема. Многочисленные теле- и радиостанции излучают электромагнитные волны различных частот, которые возбуждают в антенне радиоприемника переменные токи. Чтобы из множества колебаний выделить колебания нужной частоты, индуктивно с антенной связывают колебательный контур (рис. 175).

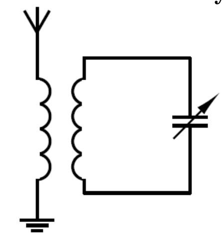


Рис. 175

Изменяя емкость конденсатора, настраивают радиоприемник на нужную волну. Когда собственная частота колебаний контура совпадает с частотой колебаний электромагнитной волны, наступает резонанс напряжений: амплитуда вынужденных колебаний нужной частоты резко увеличивается.

§78 ТРАНСФОРМАТОР

Трансформатор — электромагнитное устройство, преобразующее переменный ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения при неизменной частоте.

Самый простой трансформатор состоит из стального замкнутого сердечника (магнитопровода) (*1*), и двух обмоток (*2*, *3*) с разным количеством витков (N_1 и N_2) (рис. 176). К первичной обмотке подается электрическая энергия от источника переменного тока, ко вторичной обмотке подключают потребитель.

Переменный ток i_1, который протекает по первичной обмотке трансформатора, образует в замкнутом сердечнике переменный магнитный поток Ф. Пронизывая витки первичной и вторичной обмоток, этот поток создает ЭДС самоиндукции в первичной обмотке $e_1 = -N_1\Phi'(t)$ и ЭДС индукции во вторичной обмотке $e_2 = -N_2\Phi'(t)$.

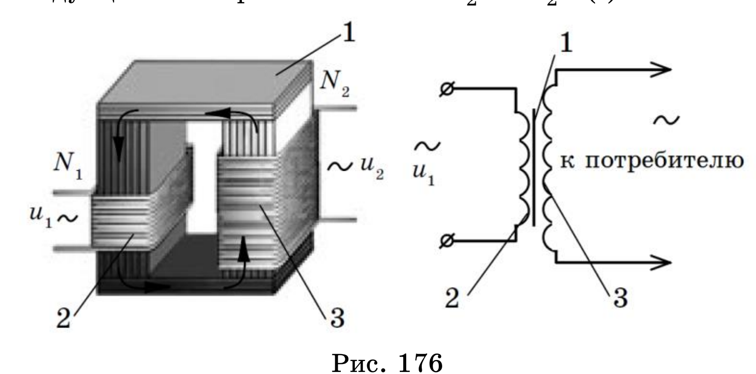


Рис. 176

Отношение мгновенного значения ЭДС, действующих значений ЭДС, индуцированных в первичной и вторичной обмотках трансформатора, равно отношению количества витков в обмотках:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{\mathscr{E}_1}{\mathscr{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = k.$$

Величину k называют **коэффициентом трансформации.**

Если $k > 1$, то $U_1 > U_2$ — трансформатор понижает напряжение, — **понижающий трансформатор**.

Если $k < 1$, то $U_1 < U_2$ — трансформатор повышает напряжение, — **повышающий трансформатор**.

Если вторичная обмотка трансформатора разомкнута, то есть трансформатор не нагружен, то работу ненагруженного трансформатора называют **холостым ходом**, в режиме которого подтверждается равенство:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{\mathscr{E}_1}{\mathscr{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = k.$$

Трансформатор не может осуществить преобразование напряжения постоянного тока, так как в этом случае магнитный поток не изменяется и ЭДС индукции не возникает.

Трансформатор нельзя подключать к источнику постоянного тока: сопротивление первичной обмотки будет небольшим, поэтому сила тока в ней возрастет настолько, что трансформатор нагреется и выйдет из строя.

При подключении потребителей в обмотках возникают нагрузочные токи I_1 и I_2.

Если потери энергии в трансформаторе незначительные, то

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}.$$

Во сколько раз трансформатор увеличивает напряжение, во столько же раз уменьшает силу тока, и наоборот.

Отношение мощности $P_2 = U_2I_2$, которую трансформатор отдает потребителю электрической энергии, к мощности $P_1 = U_1I_1$, которую трансформатор потребляет из сети, называют **коэффициентом полезного действия трансформатора***:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2I_2}{U_1I_1}$$

§79 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Электромагнитная волна — это процесс распространения тока в пространстве электрических и магнитных полей, которые периодически меняются; процесс распространения электромагнитного поля.

Электромагнитные волны излучаются зарядами, движущимися с ускорением, или переменными электрическими и магнитными полями. Если в определенной точке пространства существует переменное электрическое поле, то оно создает переменное магнитное поле, переменное магнитное поле, в свою очередь, создает переменное электрическое поле и т. д. — в пространстве распространяется электромагнитная волна.

Существование электромагнитных волн теоретически предсказал *Дж. Максвелл*. Впервые получил и исследовал их свойства *Г. Герц*.

Физические величины, характеризующие электромагнитную волну

Напряженность электрического поля $\vec{E}$ — силовая

---

* КПД трансформатора еще можно вычислить по формуле:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Cu} + P_{стали}}.$$

Здесь P_{Cu} — потери в меди (это потери на нагрев обмоток, они очень невелики, так как медный провод имеет достаточно большое сечение и низкое значение ρ_{Cu}); $P_{стали}$ — потери в стали на перемагничивание сердечника и токи Фуко; P_2 — мощность потребителя.

характеристика электрической составляющей электромагнитного поля.

Магнитная индукция магнитного поля $\vec{B}$ — силовая характеристика магнитной составляющей электромагнитного поля.

Векторы $\vec{E}$ **и** $\vec{B}$ (рис. 177):

- периодически меняются со временем и с изменением расстояния до источника света;
- одновременно достигают максимального значения и одновременно превращаются в нуль;
- перпендикулярны друг другу ($\vec{E} \perp \vec{B}$) и скорости распространения волны ($\vec{E} \perp \vec{v}$, $\vec{B} \perp \vec{v}$).

Электромагнитная волна — это поперечная волна.

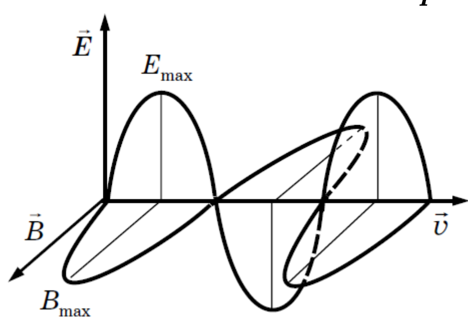


Рис. 177

Скорость распространения электромагнитной волны — расстояние, на которое распространяется волна за единицу времени:

$$v = \frac{s}{t}.$$

В вакууме $v = c = 3 \cdot 10^8$ м/с, в среде $v < c$.

Длина электромагнитной волны λ — расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду. Длина волны связана со скоростью ее распространения формулой волны:

- $c = \lambda\nu$ для вакуума;
- $v = \lambda\nu$ для окружающей среды.

Энергия электромагнитной волны — энергия электрического и магнитного полей в данной точке пространства*:

$$W = W_{эл} + W_{м}$$

Свойства электромагнитных волн

1. Электромагнитные волны частично поглощаются, проходя через диэлектрик и вблизи проводников.
2. Электромагнитные волны полностью отражаются от проводящих тел и частично отражаются от диэлектриков. При этом угол падения равен углу отражения.
3. При переходе из одной среды в другую скорость распространения электромагнитной волны изменяется, изменяется и длина волны, однако ее частота остается неизменной.
4. В диэлектрике скорость распространения волны уменьшается, волна «тормозится», поэтому электромагнитные волны преломляются при переходе из вакуума в диэлектрик.
5. Электромагнитные волны огибают препятствия, размеры которых сравнимы с длиной волны — **дифракция волн**.
6. В результате наложения электромагнитных волн наблюдается усиление или ослабление плотности энергии электромагнитного поля в данной точке — **интерференция волн**.

---

* Здесь $W_{эл} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 VE^2}{2} = w_{эл}V$, а $W_{м} = \frac{VB^2}{2\mu\mu_0} = w_{м}V$, где $w_{эл}$ и $w_{м}$ — соответственно объемная плотность энергии электрического и магнитного поля. Следовательно, энергия электромагнитной волны $W = (w_{эл} + w_{м})V$.

В любой точке пространства $w_{эл} = w_{м}$.

§80 РАДИОВОЛНЫ

Радиоволны — это электромагнитные волны высокой (несущей) частоты, модулированные по звуковому (радио) или световому (телевидение) сигналу.

Источниками радиоволн могут быть только высокочастотные электромагнитные колебания. Такие колебания возникают в колебательном контуре, однако они быстро угасают, и поэтому к контуру следует поставлять энергию.

Генератор незатухающих электромагнитных колебаний — это автоколебательная система, в которой энергия источника постоянного тока преобразуется в энергию электромагнитных колебаний, частота которых равна частоте колебательного контура, которая является частью самой системы.

Как и любая автоколебательная система, **генератор имеет четыре характерных элемента** (рис. 178):

- элемент, в котором могут происходить свободные колебания, — *колебательный контур* (*1*);
- *источник энергии* — источник постоянного тока (*2*);
- регулирующий элемент — *транзистор* (*3*);
- *устройство обратной связи* — катушка связи $L_{св}$, которая индуктивно связана с катушкой L колебательного контура.

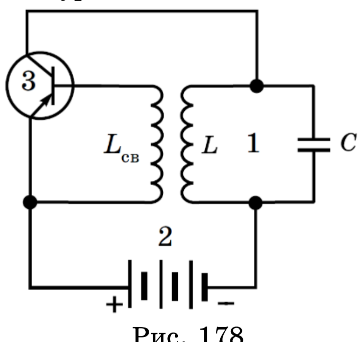


Рис. 178

Заменив верхнюю обкладку конденсатора проводом, расположенным как можно выше над поверхностью земли, и заземлив нижнюю обкладку, получим **антенну** — *устройство для приема и передачи электромагнитных волн*. Для передачи сигналов антенну связывают с колебательным контуром генератора электромагнитных колебаний.

Приемные антенны — устройства, в которых под действием электромагнитных волн возбуждаются токи высокой частоты.

Несущая (вспомогательная) частота радиоволны ν определяется собственной частотой колебательного контура радиопередатчика:

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Модуляция — это процесс изменения параметров высокочастотных электромагнитных колебаний (амплитуды, частоты, начальной фазы) с частотами намного меньших, чем частота самой волны; изменение параметров несущей волны.

Амплитудная модуляция — это изменение амплитуды колебаний несущей частоты с частотой низких колебаний (звуковой частоты); осуществляется в передающем устройстве (рис. 179, *а*).

Демодуляция — процесс, противоположный модуляции; осуществляется в приемном устройстве (детектирование с последующим выделением колебаний звуковой частоты) (рис. 179, *б*).

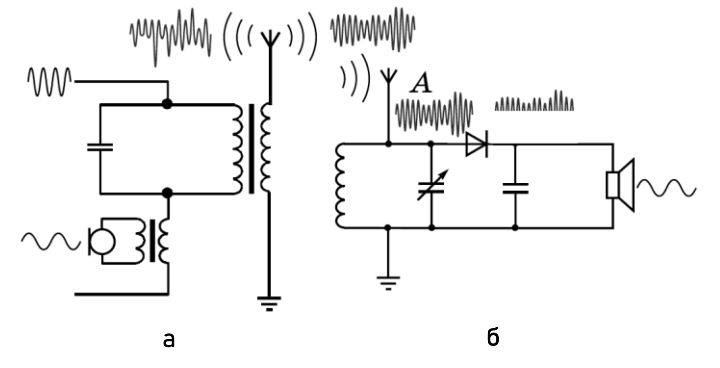


Рис. 179

Радио — это способ беспроводной передачи и приема информации с помощью электромагнитных волн.

Чтобы передавать и принимать электромагнитные волны, которые несут звуковую и оптическую информацию, нужно:

- создать высокочастотные электромагнитные колебания (с помощью генератора электромагнитных колебаний);
- наложить на высокочастотные колебания звуковую и оптическую информацию (достигается модуляцией высокочастотных колебаний колебаниями низкой частоты);
- обеспечить излучение электромагнитных волн (с помощью передающей антенны);
- обеспечить прием электромагнитных волн (с помощью приемной антенны и резонирующего колебательного контура);
- снять с принятого высокочастотного сигнала звуковую и оптическую информацию (с помощью демодулятора).

Радиоволны делятся на длинные, средние, короткие и ультракороткие (рис. 180).

КЛАССИФИКАЦИЯ РАДИОВОЛН			
Длинные (1–10 км)	**Средние** (100–1000 м)	**Короткие** (10–100 м)	**Ультракороткие** (менее 10 м)
Испытывают ощутимую дифракцию у земной поверхности и притягиваются к Земле приведенным ими индукционными токами в земной коре; распространяются далеко за горизонт	Обеспечивают устойчивую радиосвязь между удаленными пунктами на земной поверхности за пределами прямой видимости благодаря отражению радиоволн от ионосферы и способности радиоволн огибать выпуклую земную поверхность	Распространяются прямолинейно от излучающей антенны (испытывая незначительную дифракцию) и, отражаясь от ионосферы Земли, возвращаются к ее поверхности; распространяются далеко за горизонт	Пронизывают ионосферу (космическая связь), а также распространяются вдоль поверхности Земли, в зоне прямой видимости; применяют в сотовой связи, спутниковому телевидению, радиолокации

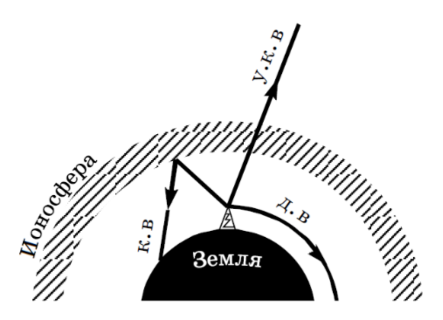


Рис. 180

Сотовая связь — один из видов мобильной радиосвязи, в основе которого лежит сотовая сеть.

Спутниковое телевидение — система передачи телевизионного сигнала от передающего центра к потребителю через искусственный спутник Земли, расположенный на геостационарной околоземной орбите над экватором.

Радиолокация — отрасль науки и техники, предметом которой является наблюдение с помощью радиотехнических методов за разными объектами, их выявления, распознавания, определения их местонахождения.

Радиолокация базируется на явлении отражения радиоволн от препятствий.

Принцип действия радиолокатора. От мощного передатчика с помощью параболической антенны ссылаются кратковременные, но очень мощные импульсы остронаправленной радиоволны. Импульсы идут через равные промежутки времени. Достигнув цели, радиоволна отражается, отраженная волна улавливается той же антенной и регистрируется приемником (рис. 181).

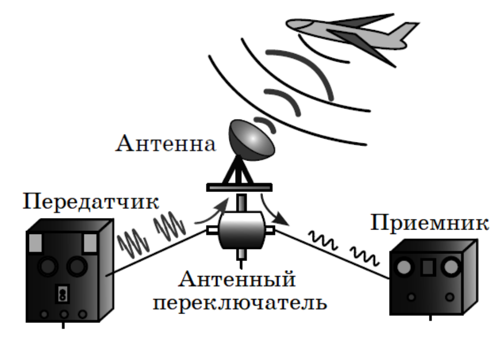


Рис. 181

Расстояние s **от объекта** определяется временем t прохождения импульса до цели и обратно:

$$s = \frac{ct}{2},$$

где c — скорость распространения света.

Минимальное расстояние s_{min} **обнаружения объекта** определяется длительностью импульса τ:

$$s_{min} = \frac{c\tau}{2}.$$

Максимальное расстояние s_{max} **обнаружения объекта** определяется интервалом времени t_0 между импульсами:

$$s_{max} = \frac{ct_0}{2} = \frac{c}{2\nu_0},$$

где ν_0 — частота ссылки импульса.

Количество колебаний в одном импульсе определяется длительностью импульса и периодом колебаний:

$$N = \frac{\tau}{T} = \tau\nu.$$

Мощность одного импульса определяется энергией одного импульса W_0 за время t_0:

$$P_0 = \frac{W_0}{t_0}.$$

РАЗДЕЛ IV. ОПТИКА

ОСНОВЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

§81 ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА В ОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

Свет — *это электромагнитные волны, которые воспринимает глаз человека, то есть волны длиной от* 380 нм (свет фиолетового цвета) до 760 нм (свет красного цвета).

Физические тела, атомы и молекулы которых излучают свет, называют **источниками света**. Источники света бывают тепловые и люминесцентные; естественные и искусственные; точечные и протяженные. Например, полярное сияние — естественный протяженный люминесцентный источник света.

Устройства, которые изменяют свои параметры в результате действия света и с помощью которых можно выявить световое излучение, называют **приемниками света**. В приемниках света энергия светового излучения переходит в другие виды энергии. *Органы зрения живых существ — естественные приемники света.*

Оптика — раздел физики, который изучает явления, связанные с распространением электромагнитных волн видимого диапазона и с взаимодействием этих волн с веществами.

Геометрическая оптика рассматривает законы распространения света в прозрачных средах только на основании представлений о свете как совокупность световых лучей.

Световой луч — линия, вдоль которой распространяется энергия световых электромагнитных волн.

Световой луч — чисто геометрическое понятие, его используют для схематического изображения световых пучков (рис. 182).

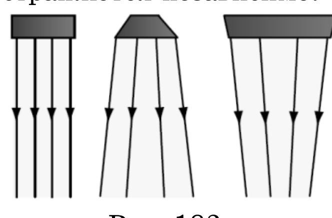
Световой пучок — это совокупность световых лучей.

Закон прямолинейного распространения света: в однородной прозрачной среде свет распространяется *прямолинейно*. Одно из свидетельств этого — образование тени и полутени за препятствием (рис. 183).

Полная тень — это область пространства, в которую не попадает свет от источника (см. рис. 183).

Полутень — это область пространства, освещенная некоторыми из имеющихся точечных источников света или частью протяженного источника (см. рис. 183).

Закон независимого распространения света*: отдельные пучки света не влияют друг на друга и распространяются независимо.


Рис. 182

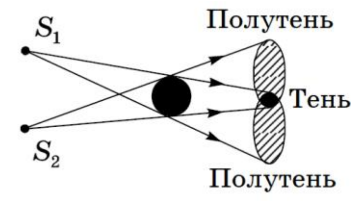


Рис. 183

* Обобщением всех законов геометрической оптики является **принцип наименьшего времени**, который имеет название **принцип Ферма**: распространение света из одной точки в другую происходит таким путем, прохождение которого требует минимального времени по сравнению с любыми другими путями между этими точками.

§82 ЗАКОНЫ ОТРАЖЕНИЯ И ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА

Угол α между падающим лучом и перпендикуляром, проведенным из точки падения, называют **углом падения**; угол β между отраженным лучом и данным перпендикуляром называют **углом отражения**.

Законы отражения света

I. Луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр к поверхности отражения, проведенный из точки падения луча, лежат в одной плоскости.

II. Угол падения равен углу отражения $\alpha = \beta$ (рис. 184).

Законы отражения света установил древнегреческий ученый *Евклид* еще в III в. до н. э.

Из закона отражения света следует **обратимость световых лучей**: если падающий луч направить по пути отраженного луча, то отраженный луч пойдет по пути падающего; луч отраженный и падающий взаимно обратные.

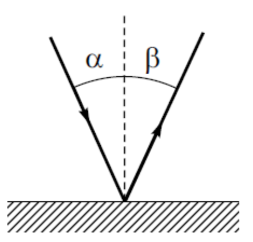


Рис. 184

Различают *зеркальное отражение света* (от гладких поверхностей) и *диффузное (рассеянное) отражение света* (от неровных, шероховатых поверхностей).

Зеркальное отражение	Диффузное отражение
Отражение света является **зеркальным**, если параллельный пучок световых лучей, падающий на плоскую поверхность, после отражения от поверхности остается параллельным.	Отражение света является **диффузным**, если параллельные световые лучи, падающие на плоскую поверхность, после отражения от поверхности распространяются в разных направлениях.
$\angle\alpha = \angle\beta$	$\angle\alpha_1 = \angle\beta_1$ $\angle\alpha_2 = \angle\beta_2$

Действительное изображение точечного источника света — это точка пересечения отраженных (или преломленных) лучей.

Мнимое изображение — точка пересечения продолжений отраженных (или преломленных) лучей от источника света.

Мнимое изображение воспринимается глазами человека, но на самом деле не существует.

Плоскую зеркальную поверхность называют **плоским зеркалом**.

Общие характеристики изображений в плоских зеркалах

1. Плоское зеркало дает мнимое изображение предмета (рис. 185, *а*).
2. Изображение предмета в плоском зеркале и собственно предмет симметричны относительно поверхности зеркала (рис. 185, *б*), и это означает:
   - — изображение предмета равно по размеру самому предмету;
   - — изображение предмета расположено на том же расстоянии от поверхности зеркала, что и сам предмет;
   - — отрезок, соединяющий точку на предмете и соответствующую ей точку на изображении, перпендикулярен поверхности зеркала.

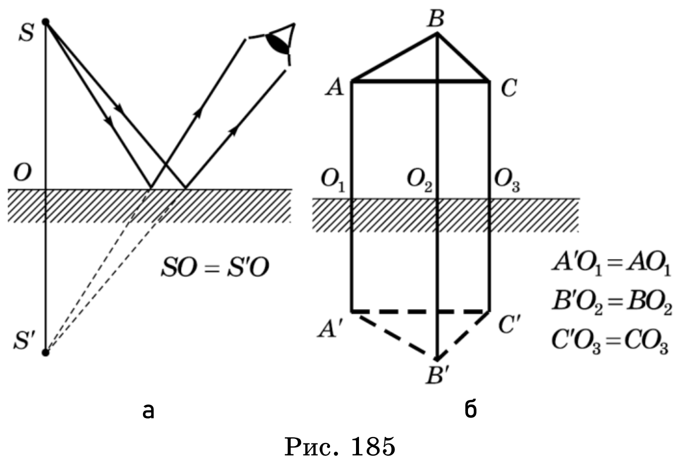


Рис. 185

Изменение направления распространения света на границе раздела двух сред называют **преломления света**.

Луч, который задает направление преломленного пучка света, называют **преломленным лучом**. Угол, образованный преломленным лучом и перпендикуляром к границе раздела двух сред, проведенным с точки падения луча, называют **углом преломления**.

Законы преломления света (законы В. Снеллиуса)

I. Луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр к границе раздела двух сред, проведенный через точку падения луча, лежат в одной плоскости.

II. Отношение синуса угла падения α к синусу угла преломления γ для двух данных сред является неизменной величиной:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = n_{21},$$

где n_{21} — физическая величина, которую называют *относительным показателем преломления* среды 2 (среды, в которой свет распространяется после преломления) относительно среды 1 (среды, из которой свет падает).

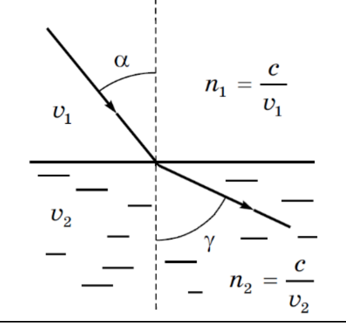
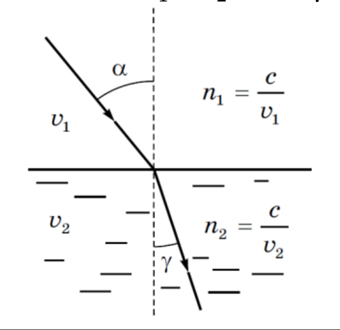
Относительный показатель преломления (n_{21}) показывает, во сколько раз скорость распространения света в среде 1 больше (или меньше), чем скорость распространения света в среде 2:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Изменение скорости распространения света в случае его перехода из одной прозрачной среды в другую является причиной преломления света.

Абсолютный показатель преломления среды n — физическая величина, характеризующая оптическую плотность среды и показывает, во сколько раз скорость v распространения света в среде меньше, чем в вакууме:

$$n = \frac{c}{v}$$

Оптическая плотность среды	
Луч из среды с большей оптической плотностью переходит в среду с меньшей оптической плотностью, если $n_1 > n_2$ и $\alpha < \gamma$	Луч из среды с меньшей оптической плотностью переходит в среду с большей оптической плотностью, если $n_1 < n_2$ и $\alpha > \gamma$
	

При падении света из оптически более плотной среды на границу раздела с оптически менее плотной средой, когда угол преломления должен стать 90°, свет полностью отражается и уже не преломляется.

Явление, когда преломление света отсутствует, то есть свет полностью отражается от границы раздела со средой с меньшей оптической плотностью, называют **явлением полного внутреннего отражения**.

Наименьший угол падения, при котором наступает полное внутреннее отражение, называют **предельным углом полного внутреннего отражения** α_0 (рис. 186):

$$\frac{\sin\alpha_0}{\sin\gamma} = n_{21}, \gamma = 90° \Rightarrow \sin\gamma = 1, \text{ то есть:}$$

$$\sin\alpha_0 = n_{21}, \text{ или } \sin\alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}$$

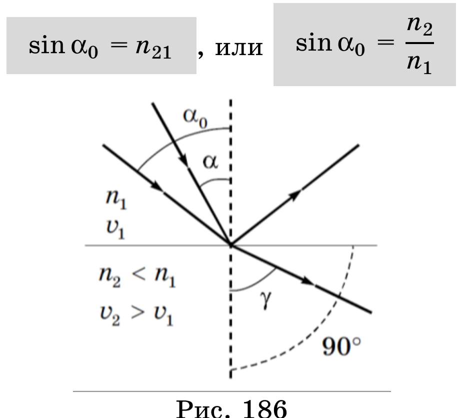


Рис. 186

Причина миражей — в полном отражении света от оптически менее густых слоев нагретого воздуха, содержащиеся вблизи разогретой Солнцем поверхности Земли.

Полное отражение света используют в *световоде*. Световод — это пучки прозрачных гибких нитей. Их используют для передачи света и изображения.

§83 ХОД ЛУЧЕЙ ЧЕРЕЗ ПЛОСКИЕ ЗЕРКАЛА, ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНУЮ ПЛАСТИНКУ И ПРИЗМУ

Ход лучей через плоские зеркала

Если плоские зеркала образуют между собой некоторый угол, то они формируют N изображений источника света, помещенного на биссектрису угла между зеркалами (рис. 187)[19]:

$$N = \frac{360°}{\alpha} - 1,$$

где α — угол между зеркалами.

---

[19] Формула справедлива для таких углов α, для которых отношение 360°/α является целым числом.

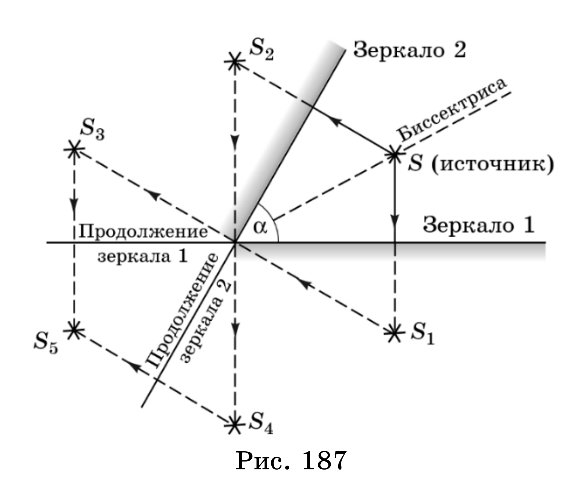


Рис. 187

Например, на рис. 187 показан источник света S, лежащий на биссектрисе угла 60°. Согласно приведенной выше формуле формируются 5 изображений:

1) изображение S_1 формируется зеркалом *1*;
2) изображение S_2 формируется зеркалом *2*;
3) изображение S_3 является отражением S_1 в зеркале *2*;
4) изображение S_4 является отражением S_2 в зеркале *1*;
5) изображение S_5 является отражением S_3 в продолжении зеркала *1* или отражением S_4 в продолжении зеркала *2* (отражения в этих зеркалах совпадают).

Ход лучей в плоскопараллельной пластинке

Ход светового луча в плоскопараллельной пластинке зависит от оптических свойств среды, в которой находится пластинка.

После прохождения через плоскопараллельную пластинку лучи выходят под тем же углом α, под которым они на нее падают. При этом пластинка смещает луч света параллельно ему на расстояние h (рис. 188):

$$h = \frac{d\sin\ \alpha - \gamma}{\cos\gamma} = d\sin\alpha\left(1 - \sqrt{\frac{1-\sin^2\alpha}{n^2-\sin^2\alpha}}\right),$$ [20]

где d — толщина плоскопараллельной пластинки; α — угол падения луча на плоскопараллельную пластинку; γ — угол преломления; n — относительный показатель преломления материала пластинки (относительно той среды, в которую помещена пластинка).

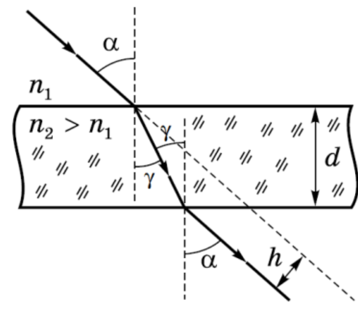


Рис. 188

Ход лучей в призме

Грани призмы, через которые проходит луч света, называются преломляющими. Угол между преломляющими гранями призмы называется преломляющим углом призмы.

Луч света после преломления на гранях призмы отклоняется к основанию призмы, если $n_н > n_{окр.\,ср}$.

Во многих оптических приборах направление распространения света изменяют с помощью призм полного отражения (рис. 189, *а*).

Изображение точки в призме — мнимое, смещено в сторону преломляющего угла (φ) призмы (рис. 189, *б*).

Если световой луч падает на преломляющую грань призмы под произвольным углом, то угол отклонения луча призмой $\varphi_1 = \alpha + \gamma_1 - \varphi$ (рис. 189, *в*).

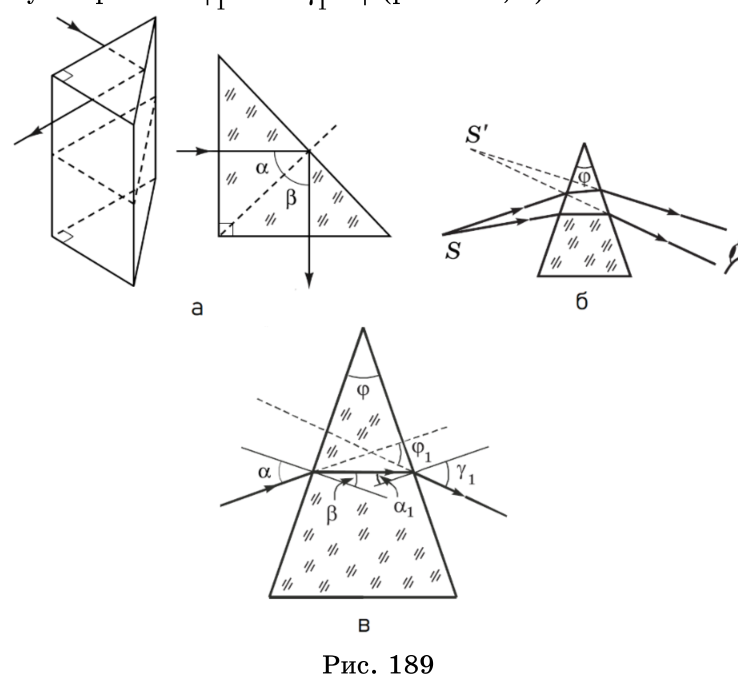


Рис. 189

§84 Линзы

Линза (сферическая) — это прозрачное тело, ограниченное с двух противоположных сторон сферическими поверхностями (в частности, одна из поверхностей может быть плоскостью).

По форме линзы делятся на выпуклые (рис. 190, *а*) и вогнутые (рис. 190, *б*).

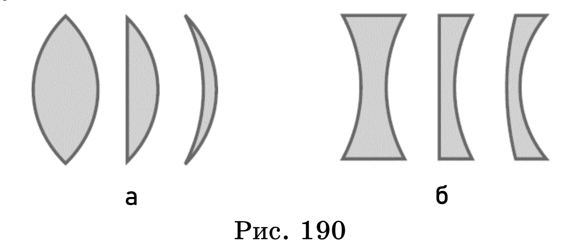


Рис. 190

Линза является **собирающей**, если она превращает параллельный пучок лучей на сходящий.

Линза является **рассеивающей**, если она превращает параллельный пучок лучей на расходящий.

Если коэффициент преломления вещества, из которого изготовлена линза, больше коэффициента преломления окружающей среды ($n_л > n_с$), то выпуклая линза будет собирающей, а вогнутая — рассеивающей (например, стеклянная линза в воздухе). Если $n_л < n_с$, то выпуклая линза будет рассеивающей, а вогнутая — собирающей (например, воздушная линза в воде).

Линзу называют **тонкой**, если толщина линзы d во много раз меньше радиусов R_1 и R_2 сферических поверхностей, ограничивающих линзу (рис. 191).

Основные точки и линии линзы

- *Главная оптическая ось* — прямая, проходящая через центры сферических поверхностей.
- *Оптический центр О* — точка главной оптической оси, при прохождении через которую световой луч света не меняет направления.
- *Побочная оптическая ось* — прямая, проведенная через главный оптический центр линзы, не совпадающая с главной оптической осью.

[20] Данные формулы выводятся с помощью геометрических преобразований.

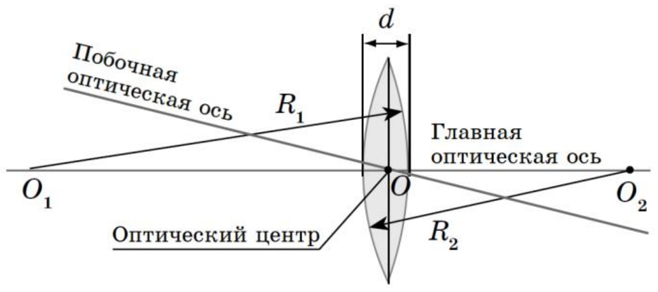


Рис. 191

- *Фокус F* — точка, в которой после прохождения в линзе собираются лучи, параллельные главной оптической оси линзы, или продолжение этих лучей. Главный фокус собирающей линзы является действительным (рис. 192, *а*), рассеивающей — мнимым (рис. 192, *б*).

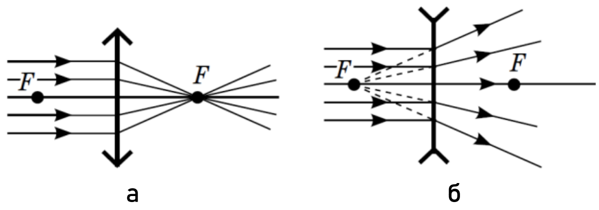


Рис. 192

- *Фокальная плоскость* — это плоскость, перпендикулярная главной оптической оси, проходящая через фокус (рис. 193, *а*, *б*).

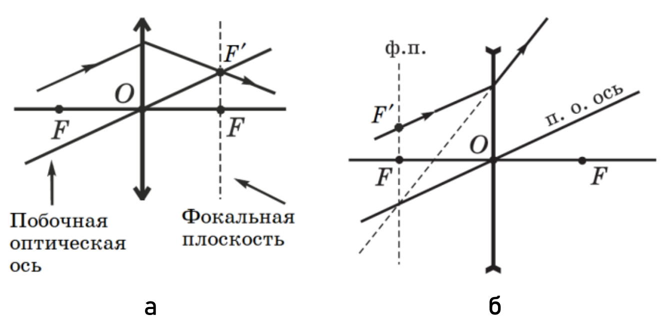


Рис. 193

Все фокусы линзы находятся на фокальной плоскости линзы, перпендикулярной главной оптической оси линзы и проходит через фокус. Любая линза имеет два главных фокуса и две фокальные плоскости, расположенные на одинаковом расстоянии от линзы.

Луч, проходящий через оптический центр, не преломляется.

Фокусное расстояние линзы F — расстояние от оптического центра линзы до ее главного фокуса.

Единица фокусного расстояния в СИ — **метр** (м).

Фокусное расстояние *собирающей* линзы считают *положительной*, а *рассеивающей* линзы — *отрицательной*.

Оптическая сила линзы D — физическая величина, характеризующая преломляющие свойства линзы и является обратной фокусному расстоянию линзы*:

$$D = \frac{1}{F}$$

Единица оптической силы в СИ — **диоптрия** (дптр).

1 диоптрия — это оптическая сила такой линзы, фокусное расстояние которой равно 1 метр (дптр = $м^{-1}$).

Если линза *собирающая*, ее оптическая сила *положительная*, если линза *рассеивающая*, ее оптическая сила *отрицательная*.

Оптическую силу n соприкасающихся линз определяют по формуле: $D = D_1 + D_2 + ... + D_n$.

ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ТОНКИХ ЛИНЗАХ	
Изображение	**Характеристика**
2, 1, h, l, 2F, F, O, F, H, d, f	Изображение действительное, перевернутое, уменьшенное. Такое изображение получается, например, на сетчатке глаза или на матрице фотоаппарата.
2, f, h, 2F, F, F, 2F, H, d	Изображение действительное, перевернутое, уменьшенное. Такое изображение на экране дает проекционный аппарат.
H, h, l, F, O, F, d, f	Изображение мнимое, прямое, увеличенное, расположенное по ту же сторону от линзы, что и сам предмет. Такое изображение дает лупа или микроскоп.
H, h, O, F, l, 2F, F	Рассеивающая линза всегда дает мнимое, прямое, уменьшенное изображение, расположенное по ту же сторону от линзы, что и сам предмет.

Если предмет расположен в двойном фокусе собирающей линзы, то изображение действительное, перевернутое, равное.

Если предмет расположен в фокусе собирающей линзы, то изображения не существует (лучи после преломления в линзе будут параллельны).

Мнимое изображение всегда находится с той же стороны линзы, что и сам предмет, действительное — с другой стороны линзы.

Размер линзы (или частичное затемнение) влияет только на яркость изображения, но никоим образом не влияет на его вид.

---

* Оптическая сила линзы связана с радиусами сферических поверхностей, ее ограничивают, формулой:

$$D = \left(\frac{n_л}{n_с} - 1\right)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right),$$

где $n_л$, $n_с$ — абсолютные показатели преломления материала, из которого изготовлена линза, и среды, в которой находится линза; R_1 и R_2 — радиусы сферических поверхностей, ограничивающих линзу. Для выпуклой поверхности R берут со знаком «+», для вогнутой — со знаком «−», для плоской — $R = \infty$.

Формула тонкой линзы:

$$D = \frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$$

Здесь D — оптическая сила линзы, F — фокусное расстояние линзы, d — расстояние между линзой и предметом; f — расстояние между линзой и изображением.

Правила знаков при использовании формулы тонкой линзы

1. Если линза собирающая, то фокусное расстояние F следует брать со знаком «+»; если рассеивающая — со знаком «−»;
2. Если изображение действительное, то расстояние f от линзы до изображения следует брать со знаком «+»; если изображение мнимое — со знаком «−».
3. Расстояние d от предмета до линзы всегда берут со знаком «+» (действительный источник); но если источник мнимый (лучи падают на линзу сходящим пучком), то d берут со знаком «−» (рис. 194).

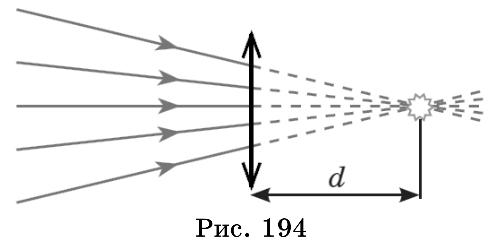


Рис. 194

Линейное увеличение линзы Г — это отношение линейного размера H изображения предмета к линейному размеру h самого предмета:

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \left|\frac{f}{d}\right|$$

§85 ГЛАЗ КАК ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Оптическая система — совокупность оптических элементов, предназначенных для формирования пучков световых лучей или для получения изображений.

Глаз представляет собой оптическую систему, которая дает изображение на светочувствительной сетчатой оболочке глазного яблока — сетчатке.

Глаз как оптический прибор (рис. 195) состоит из четырех линз:

- *роговая оболочка 1* — основная при оптической силе линзы;
- *выпукло-вогнутая жидкая линза* (передняя камера) — рассеивающая линза, основной компенсатор аберрации в оптической системе глаза;
- *хрусталик 3* — линза, которая обеспечивает аккомодацию глаза;
- *стекловидное тело 4*.

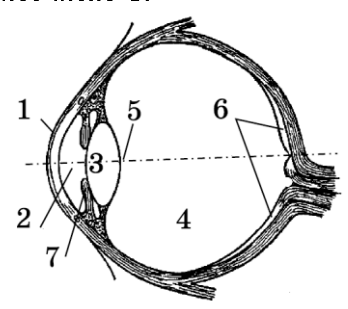


Рис. 195

Оптический центр глаза *5* находится около задней стенки хрусталика. Перед хрусталиком есть так называемая *радужная оболочка 7*, которая посередине имеет отверстие — *зрачок 2*; она может изменять свой диаметр в зависимости от того, какое количество света попадает в глаз. В случае усиления интенсивности света зрачок сужается, в случае ослабления — расширяется. За хрусталиком находится *глазное яблоко*, заполненное *стекловидным телом*. На дне глазного яблока находится *сетчатка 6*, которая воспринимает изображение. Через оболочку глаза в задней части входит *зрительный нерв*.

Способность глаза приспосабливаться к различной яркости наблюдаемых предметов называют **адаптацией.**

Способность хрусталика менять свою кривизну при изменении расстояния до рассматриваемого предмета называют **аккомодацией.**

Границы аккомодации для нормального глаза от 15–20 см до ∞.

Способность глаза к аккомодации обеспечивает изображение предметов на поверхности сетчатки.

Расстояние наилучшего зрения (L_0) — это расстояние до предмета, которое рассматривается, когда глаз аккомодирует при ненапряженном хрусталике. Для нормального зрения $L_0 = 25–30$ см.

ВИДЫ ЗРЕНИЯ И ИХ ИСПРАВЛЕНИЕ		
Нормальное зрение	**Близорукость**	**Дальнозоркость**
У человека с нормальным зрением фокус оптической системы глаза в спокойном состоянии находится на сетчатке, поэтому изображение предметов четкое	При близорукости фокус находится перед сетчаткой и изображение предметов на сетчатке будут размытыми. Близорукость корректируется ношением очков с рассеивающими линзами или рассеивающих контактных линз.	При дальнозоркости фокус находится за сетчаткой, поэтому изображение предметов будут нечетким. Дальнозоркость корректируется ношением очков с собирающими линзами или собирающих контактных линз

Угол зрения φ — угол с вершиной в оптическом центре глаза, образованный лучами, направленными на крайние точки предмета (рис. 196)[21]:

$$\varphi = \frac{h}{d} = \frac{H}{F}$$

Обычно угол зрения, под которым человек рассматривает предмет, достаточно малым ($\varphi < 0{,}1$ рад), поэтому

$$\varphi \approx \sin\varphi \approx \operatorname{tg}\varphi\,.$$

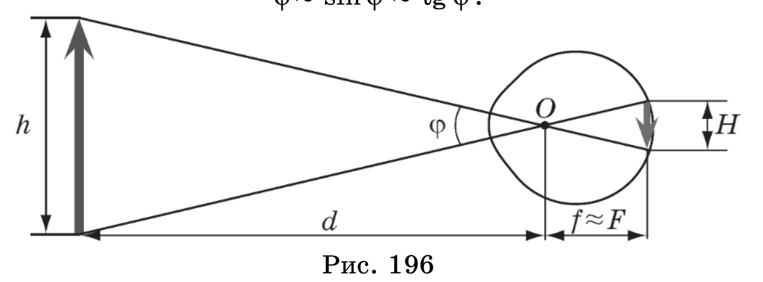


Рис. 196

[21] Здесь угол зрения φ измеряется в радианах.

ОСНОВЫ ВОЛНОВОЙ ОПТИКИ

§86 ДИСПЕРСИЯ СВЕТА. СПЕКТРОСКОП

Волновая оптика рассматривает свет как электромагнитные волны определенной частоты.

Белый свет — это свет, в котором поданы излучения всех частот видимой части спектра. По **спектру** Ньютона выделяют семь основных цветов света (в порядке увеличения частоты световой волны и уменьшения длины): *красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый* (рис. 197).

При попадании белого света на некоторое тело часть световой энергии отражается (или проходит сквозь прозрачное тело), а часть — поглощается.

Дисперсия света — это явление разложения света в спектр, которое обусловлено зависимостью абсолютного показателя преломления света от частоты световой волны.

При переходе в среду с большей оптической плотностью длина волны λ, как и ее скорость v уменьшается; при этом частота ν световой волны, а значит, и цвет света остаются неизменными:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

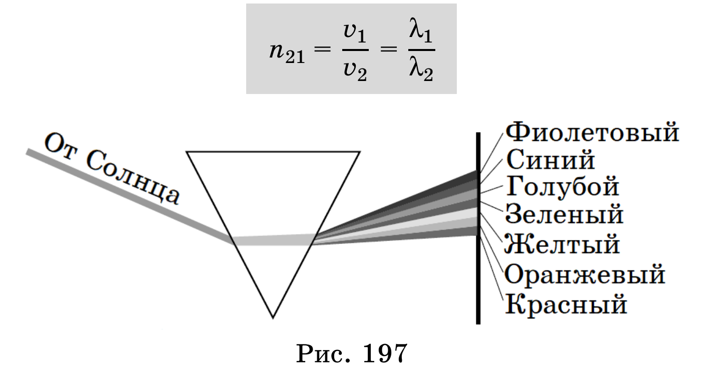


Рис. 197

Рассеивание света — это явление преобразования света материальной средой, которое сопровождается изменением направления распространения света и проявляется как несобственное свечение среды.

Поглощение света — уменьшение интенсивности света, проходящего через материальную среду.

Все многообразие цветов, которые имеют тела вокруг нас, обусловлено *спектральным составом света, падающего на тела и способностью этих тел отражать (рассеивать) световые волны той или иной частоты (длины)*. Если тело освещается белым светом и отражает все падающие световые волны, то тело будет казаться нам белым; если тело отражает волны преимущественно синего цвета, а другие поглощает, тело будет казаться синим. Если тело почти полностью поглощает падающий свет, тело будет казаться черным. Цвет тела зависит также от состава падающего света, а значит, *понятие цвета в темноте лишено любого смысла*.

Излучаемое любым источником свет, как правило, имеет сложное строение. Совокупность частот световых волн, содержащиеся в излучении любого вещества, называют *спектром излучения этого вещества*. Для каждого вещества в газообразном атомарном состоянии спектр излучения не совпадает со спектром излучения любого другого вещества. Именно на этой уникальности основывается **спектральный анализ** — метод определения химического состава вещества по его спектру.

Спектральные аппараты — приборы для исследования спектрального состава света (рис. 198, *а*). *Действие* спектроскопа *основывается на дисперсии света*. Такой аппарат состоит из трех основных частей: *коллиматора, призмы, линзы*.

Коллиматор представляет собой узкую трубку (*1*), на одном конце которой расположена ширма с щелью, которая находится в фокусе собирающей линзы (*2*) (рис. 198, *б*). Узкий параллельный пучок света от коллиматора направляется на призму (*3*). Поскольку каждой частоте света (каждому цвету) соответствует собственный показатель преломления, то после преломления с призмы выходят монохроматические параллельные пучки[22], каждый из которых отклоняется на собственный угол. Если пучки фокусируются собирающей линзой (*4*) на экране, такой прибор называют спектрографом, если вместо экрана используется зрительная труба — спектроскопом.

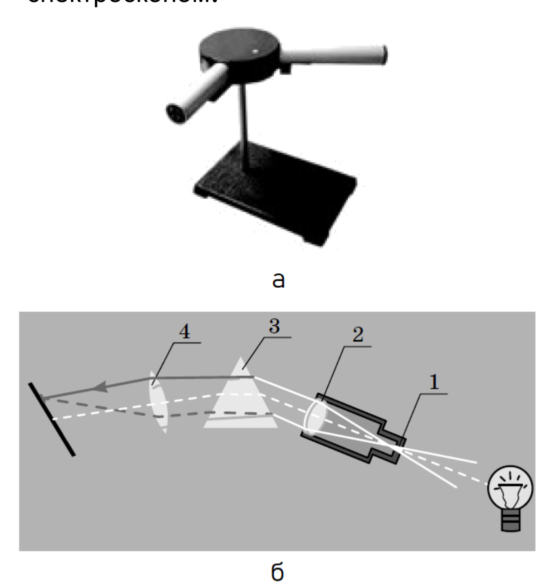


Рис. 198

§87 ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Свет — это электромагнитная волна, а для любых волн выполняется *принцип суперпозиции*: если в определенную точку пространства поступают волны от нескольких источников, то эти *волны накладываются друг на друга*.

Интерференция — явление наложения волн, в результате которого в некоторых точках пространства наблюдается устойчивое во времени усиление (или ослабление) результирующих колебаний.

Чтобы в определенных точках пространства все время могло происходить усиление или ослабление результирующих колебаний, необходимо выполнение двух условий, которые называют **условиями когерентности волн**:

- волны должны иметь одинаковую частоту (соответственно и длину);
- разница $\Delta\varphi$ начальных фаз волн должна быть неизменной (волны, которые накладываются, должны иметь неизменный во времени сдвиг фаз).

---

22 Свет одной определенной частоты (длины волны) называют *монохроматическим*.

Волны, которые соответствуют условиям когерентности, называют **когерентными волнами**.

Во время интерференции энергия не исчезает — происходит ее перераспределение в пространстве.

Идеальными источниками когерентных световых волн являются **лазеры** — оптические квантовые генераторы.

- Световой поток, излучаемый лазером, имеет неизменную одну частоту (длину волны), то есть является монохроматическим.
- Все электромагнитные колебания лазерного светового потока являются синфазными (сдвиг фаз неизменный и равен нулю).

Если две когерентные световые волны, которые распространяются в однородной среде и поступают в произвольную точку M, расположенную на расстоянии d_1 от источника света S_1 и на расстоянии d_2 от источника света S_2 (рис. 199), то расстояние $\Delta d = |d_1 - d_2|$ называют **геометрической разницей хода волн**[23].

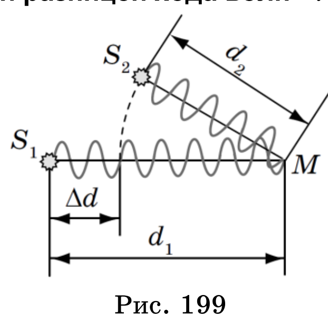


Рис. 199

Если волны отходят от источников S_1 и S_2 в одинаковых фазах, а геометрическая разность хода равна целому числу длин волн (четному числу полуволн), то в точке M происходят электромагнитные колебания с увеличенной амплитудой: $A = A_1 + A_2$ (рис. 200), то есть наблюдается максимум освещенности.

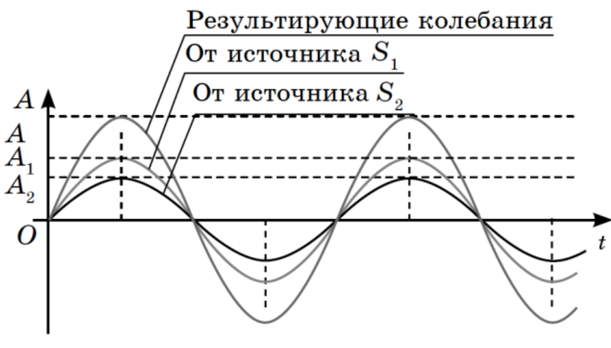


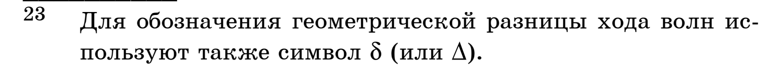
Рис. 200

Условие интерференционного максимума: в данной точке пространства происходит усиление результирующих световых колебаний, если разность хода двух световых волн, поступающих в эту точку, равна целому числу длин волн (четному числу полуволн):

$$\Delta d = k\lambda = 2k\frac{\lambda}{2},$$

где λ — длина световой волны в среде; k — целое число.

Если волны отходят от источников S_1 и S_2 в одинаковых фазах, а геометрическая разность хода равна нечетному числу полуволн, то в точке M происходят электромагнитные колебания с уменьшенной амплитудой: $A = A_1 - A_2$ (рис. 201), то есть наблюдается минимум освещенности.



[23] Для обозначения геометрической разницы хода волн используют также символ δ (или Δ).

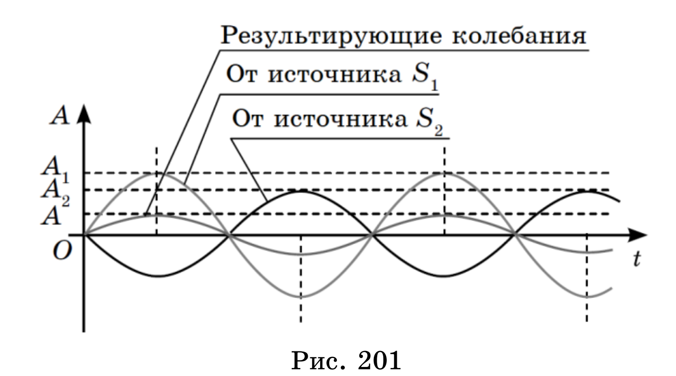


Рис. 201

Условие интерференционного минимума: в данной точке пространства происходит ослабление результирующих световых колебаний, если разность хода двух световых волн, поступающих в эту точку, равна нечетному числу полуволн:

$$\Delta d = (2k+1)\frac{\lambda}{2},$$

где λ — длина световой волны в среде; k — целое число.

Наблюдение интерференции света

1. Если тонкую пленку с плоскопараллельными гранями осветить монохроматическим светом и изменять наклон, она будет выглядеть то темной, то ярко окрашенной (разность хода зависит от угла падения света).
2. Если тонкая пленка ровная по наклону (клин), то вдоль пленки разность хода равномерно меняется и наблюдается ряд светлых и темных полос. При освещении белым светом интерференционные полосы окрашены всеми цветами спектра видимого излучения в соответствии с увеличением длины волн света — **интерференционный спектр** (рис. 202).

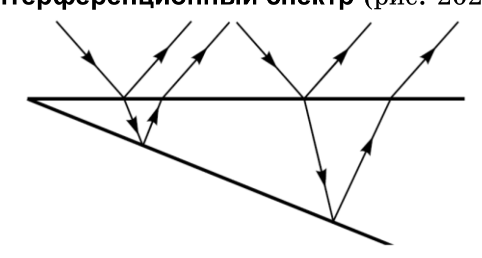


Рис. 202

Интерференция белого света в пленках на воде, мыльных пузырях и т. д. дает хаотическую окраску, поскольку наклон и толщина пленки хаотично меняются.

Применение интерференции света

- Интерференцию на тонких пленках применяют для *просветления оптики*. На поверхность линзы наносят тонкую пленку такой толщины h, чтобы разность хода Δd лучей, отраженных от внешней и внутренней поверхностей пленки, равнялась полволны:

$$\Delta d = 2h = \frac{\lambda}{2},$$

где $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$ — длина световой волны в пленке, λ_0 — длина световой волны в вакууме, n — показатель преломления вещества пленки.

- С помощью интерференции оценивают *качество шлифовки поверхности изделия* (рис. 203, *а*); если образец гладкий, то интерференционные полосы параллельны (рис. 203, *б*); если же на поверхности образца есть царапина — интерференционные полосы искривлены в сторону увеличения толщины воздушного клина (рис. 203, *в*).

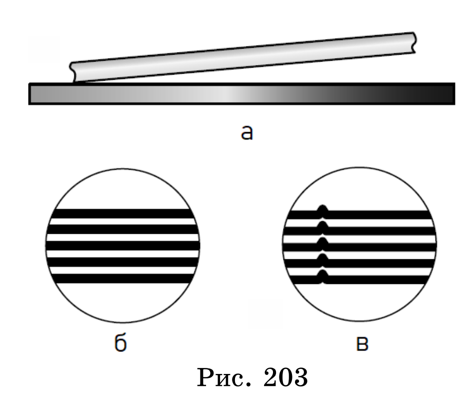
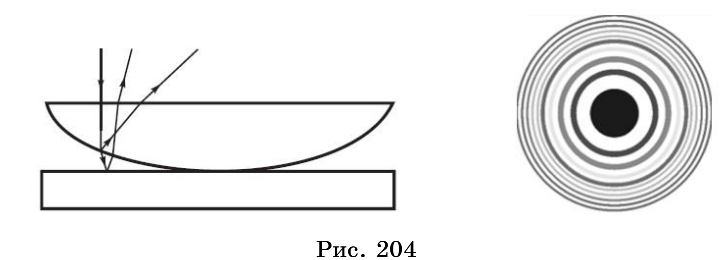


Рис. 203

Кольца Ньютона — это интерференция белого света в тонком слое воздуха между стеклянными пластинками — плоской и выпуклой сферической. Наблюдаем интерференционные полосы, окрашенные всеми цветами радуги, в виде колец (кольца Ньютона) (рис. 204).


Рис. 204

- С помощью интерференции получают *голографические изображения* и др.

§88 ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Дифракция — это явление огибания волнами краев неоднородностей.

Дифракция света — это явление отклонения прямолинейного распространения света в однородной среде при его прохождении мимо препятствий или через отверстия; проникновение света в зону геометрической тени (рис. 205).

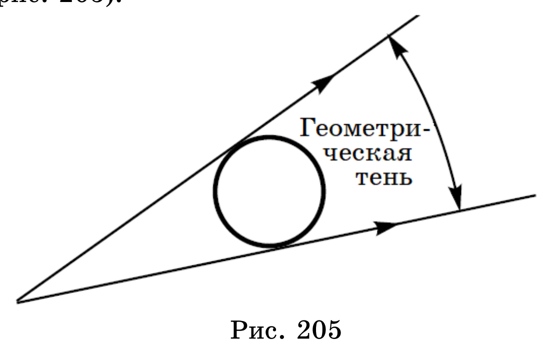


Рис. 205

Дифракция присуща любым волнам независимо от их природы и наблюдается в *двух случаях*:
- когда линейные размеры препятствий, на которые падает волна (или размеры отверстий, через которые волна распространяется), сравнимые с длиной волны;
- когда расстояние от препятствия до места наблюдения намного больше размера препятствия.

Волны, которые огибают препятствие, когерентные, поэтому дифракция всегда сопровождается интерференцией. Интерференционную картину, полученную в результате дифракции, называют **дифракционной картиной**.

Вблизи препятствия наблюдаем только размытость краев геометрической тени на экране.

Количественную теорию дифракции света построил французский физик *О. Ж. Френель*, сформулировав принцип, который со временем получил название **принцип Гюйгенса — Френеля**: каждая точка волновой поверхности является источником вторичной волны, эти вторичные волны являются когерентными; волновая поверхность в любой момент времени является результатом интерференции вторичных волн.

Дифракционная решетка — это оптическое устройство, действие которого основано на явлении дифракции света и который представляет собой совокупность большого количества параллельных штрихов, нанесенных на определенную поверхность на одинаковом расстоянии друг от друга (до 2000 на 1 мм). Дифракционная решетка служит для получения *дифракционных спектров* и измерения длины световой волны.

Общую ширину d непрозрачного и прозрачного участков дифракционной решетки называют **периодом решетки** или **постоянной решетки**:

$$d = a + D = \frac{l}{N},$$

где a — ширина непрозрачного участка (в прозрачных решетках) или полосы, которые рассеивает свет (в отражательных решетках); D — ширина прозрачного участка (или полосы, отражающей свет) (рис. 206); N — количество штрихов на отрезке длиной l.

При падении на решетку пучка параллельных лучей перпендикулярно к плоскости решетки (плоской волны), свет от каждой щели благодаря дифракции пойдет пучком, рассеянным во всех направлениях (см. рис. 206).

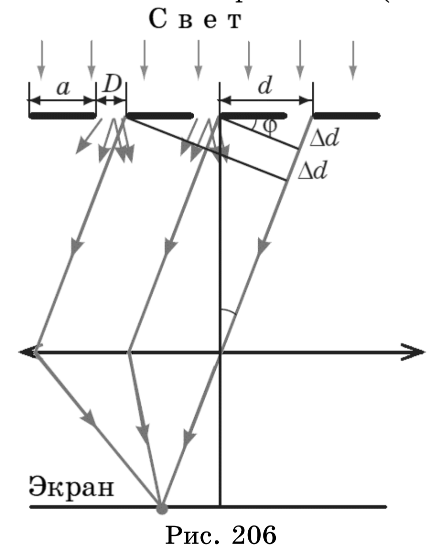


Рис. 206

Световые волны, полученные от каждой щели, является когерентными, и при наложении друг на друга создают на экране интерференционную картину (ряд полос определенного цвета, если свет монохроматический, или ряд разноцветных полос, если свет немонохроматический).

Формула дифракционной решетки:

$$d \sin \varphi = k\lambda,$$

где d — период дифракционной решетки; k — целое число: $k = 0$ — соответствует центральному (нулевому) максимуму ($\Delta d = 0$), $k = \pm 1$ — соответствует максимумам первого порядка ($\Delta d = \lambda$) и т. д.; φ — угол, под которым на экране наблюдается максимум k-го порядка для световой волны длиной λ (рис. 207).

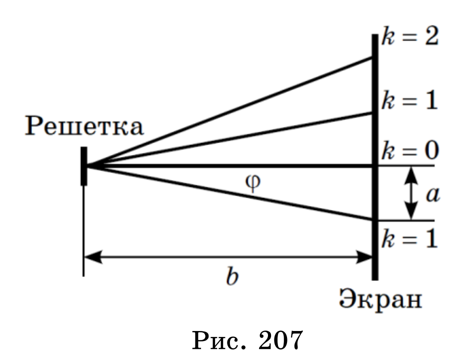


Рис. 207

Угол φ, при котором наблюдается интерференционный максимум, зависит от длины волны, поэтому *дифракционные решетки раскладывают немонохроматический свет в спектр. Такой спектр называют* **дифракционным**. Вследствие того что длина волны фиолетового цвета меньше длины волны красного цвета, *в дифракционном спектре красные линии расположены дальше от центрального максимума, чем фиолетовые*.

Для центрального максимума разность хода волн любой длины равна нулю, поэтому он всегда имеет цвет света, освещающий решетку.

При небольших углах (3–5°):

$$\sin\varphi \approx \operatorname{tg}\varphi = \frac{a}{b},$$

поэтому формула дифракционной решетки принимает вид:

$$\frac{da}{b} = k\lambda,$$

где a — расстояние от центрального максимума ($k = 0$) до максимума данного порядка, b — расстояние от решетки до экрана (см. рис. 207).

§89 ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА. ПОЛЯРИЗОИДЫ

Световая волна характеризуется *вектором напряженности* $\vec{E}$ и *вектором магнитной индукции* $\vec{B}$, которые колеблются во взаимно перпендикулярных плоскостях. Плоскость, в которой колеблется вектор напряженности $\vec{E}$, называют *плоскостью колебаний*. Плоскость, в которой совершает колебания вектор магнитной индукции $\vec{B}$, называют *плоскостью поляризации*.

Отдельно взятые атом или молекула излучают электромагнитную волну, для которой плоскость колебаний вектора $\vec{E}$, а значит, и вектора $\vec{B}$ является четко фиксированной (рис. 208).

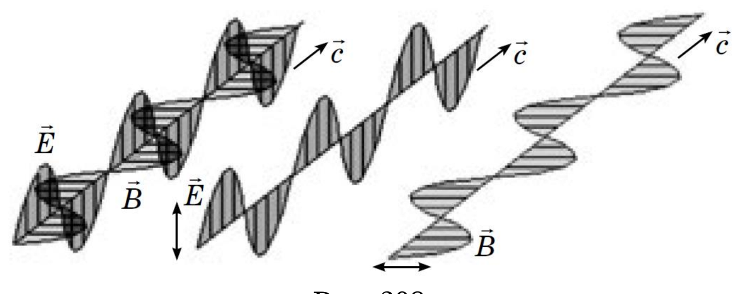


Рис. 208

Электромагнитную световую волну называют **естественной (неполяризованной)**, поскольку вдоль луча колебания $\vec{E}$ и $\vec{B}$ происходят во всех плоскостях, перпендикулярных направлению луча (рис. 209, *а*). Примерами неполяризованного света являются солнечное излучение, излучение ламп накаливания, лампы дневного света и т. п.

Устройство, которое преобразует естественный свет в поляризованный, называют **поляризатором** (рис. 209, *б*). Поляризатором является кристалл турмалина, который пропускает свет с колебаниями $\vec{E}$ и $\vec{B}$ только в определенных плоскостях, перпендикулярных к оси кристалла. Такой свет называют **плоскополяризованным** или **линейно поляризованным**.

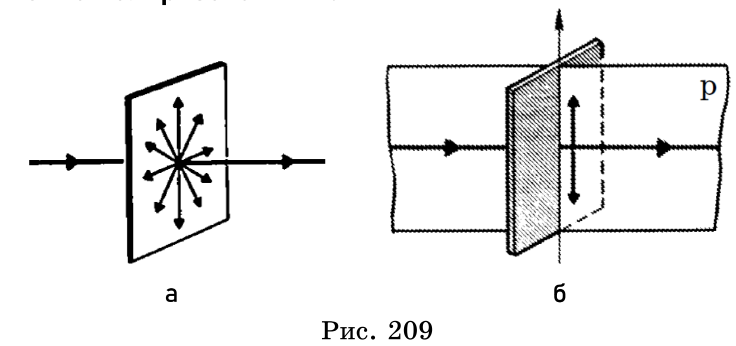


Рис. 209

Выявляется поляризация с помощью **анализатора** (второго кристалла турмалина). Анализатор определяет плоскость, в которой происходят колебания в поляризованном пучке.

Поляризаторы и анализаторы имеют общее название — **поляризоиды**.

Если оси кристаллов расположены взаимно перпендикулярно, свет не проходит.

При отражении и преломлении света происходит **частичная поляризация света** — колебания $\vec{E}$ и $\vec{B}$ в одной плоскости превышают колебания в других плоскостях.

Поляризация света — важное доказательство поперечности световых волн.

Закон Брюстера: для каждой пары прозрачных сред существует угол падения α_{B}, при котором отраженный свет становится полностью плоскополяризованным:

$$\operatorname{tg}\alpha_{\text{B}} = n_{21},$$

где n_{21} — показатель преломления среды 2 относительно среды 1.

Этот угол падения называют *углом Брюстера*. *При угле Брюстера отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны* (рис. 210).

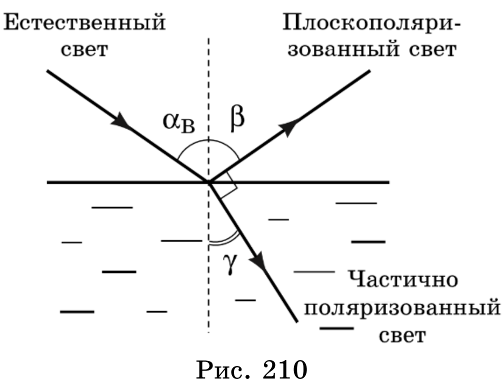


Рис. 210

ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ОПТИКИ

§90 ГИПОТЕЗА ПЛАНКА. СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ

Квантовая оптика рассматривает свет как поток частиц — *фотонов*, имеющих энергию, но не имеющих массы.

Зарождение квантовой теории связано с установлением закономерностей излучения **абсолютно черного тела** — физической модели тела, которая полностью поглощает любое излучение, падающее на него.

Гипотеза Планка: излучение электромагнитных волн атомами и молекулами вещества происходит не непрерывно, а дискретно, то есть отдельными порциями, энергия E каждой из которых прямо пропорциональна частоте ν излучения:

$$E = h\nu,$$

где h — постоянная величина.

Со временем «порции энергии» стали называть *квантами энергии*, а постоянную h — *постоянной Планка*, которая примерно равна $6{,}63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с.

Вывод Эйнштейна: любое электромагнитное излучение состоит из отдельных частиц — *квантов*; свет излучается, поглощается и распространяется отдельными частицами — *фотонами*; чем больше частиц за единицу времени падает на эту поверхность, тем больше интенсивность света.

Фотон — это частица света, квант электромагнитного излучения.

Свойства фотонов

1. *Заряд фотона равен нулю*: $q = 0$ — фотон является электрически нейтральной частицей.
2. *Масса фотона равна нулю**: $m = 0$ — фотон является безмассовой частицей.
3. Скорость движения фотона не зависит от выбора системы отсчета, всегда равна скорости распространения света в вакууме ($v_ф = c = 3 \cdot 10^8$ м/с) и связана с частотой и длиной соответствующей световой волны формулой волны: $c = \lambda\nu$.
4. *Энергия фотона* прямо пропорциональна частоте электромагнитного излучения, квантом которого и является этот фотон: $E = h\nu$. *В случае поглощения света веществом фотон передает всю энергию частицам вещества.*
5. *Импульс фотона* равен отношению его энергии к скорости движения и обратно пропорционален длине волны фотона:
$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$
6. *Фотоны излучаются*: при переходе атомов из возбужденного состояния в состояние с меньшей энергией; во время ускоренного движения заряженных частиц; при распаде некоторых ядер; при аннигиляции — реакции превращения частицы и античастицы в другие частицы, например, фотоны.

Если источник излучает N фотонов, то их общая энергия составляет $W = NE = Nh\nu$, а мощность излучения равна $P = \dfrac{W}{t} = \dfrac{Nh\nu}{t}$.

* Фотон является безмассовой частицей, однако свет в целом (как поток фотонов), согласно законам теории относительности, имеет массу. Так, для системы двух фотонов, которые имеют одинаковую энергию ($E = h\nu$) и летят под углом Θ друг к другу, масса системы определяется соотношением:
$$M = \frac{2E}{c^2} \sin\frac{\Theta}{2}.$$

§91 ФОТОЭФФЕКТ

Фотоэффект — это явление взаимодействия света с веществом, которое сопровождается излучением (эмиссией) электронов, которые в этом случае называют фотоэлектронами.

Различают: *внешний фотоэффект*, при котором электроны вылетают за пределы тела, при этом тело тратит часть электронов и приобретает положительный заряд (рис. 211), и *внутренний фотоэффект*, при котором электроны, «вырванные» светом из атомов вещества, остаются в его середине.

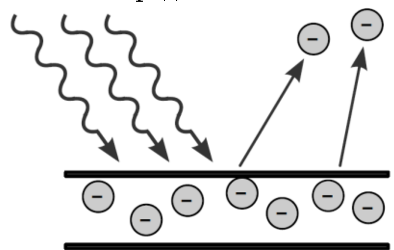


Рис. 211

Внешний фотоэффект открыл немецкий физик *Г. Герц* (1887 г.) и экспериментально исследовал российский ученый *А. Г. Столетов* (1888–1890 гг.).

Для изучения фотоэффекта А. Г. Столетов использовал устройство, схематическое изображение которого представлено на рис. 212.

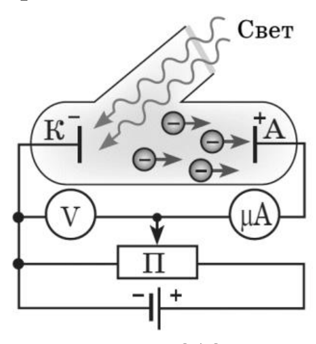


Рис. 212

Внутри камеры, из которой выкачан воздух, расположены два электрода (анод А и катод К). На электроды подается напряжение от источника тока, которое регулируется. Световой пучок, падающий на катод, «вырывает» из его поверхности электроны. Двигаясь от катода к аноду, фотоэлектроны создают **фототок**, сила которого измеряется миллиамперметром μA. Если с помощью потенциометра П увеличивать напряжение на электродах, сила фототока тоже увеличивается (рис. 213).

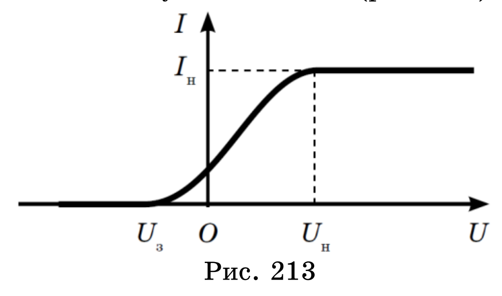


Рис. 213

При отсутствии напряжения между электродами фототок не исчезает. Это можно объяснить наличием у фотоэлектронов определенной кинетической энергии:

$$E_k = \frac{m_e v^2}{2},$$

где m_e — масса электрона, v — скорость, которую имеет электрон, в момент «отрыва» от катода.

При некотором напряжении между электродами сила фототока перестает увеличиваться, то есть достигает насыщения $I_н$. Начиная с этого момента все электроны, покинувшие катод, достигают анода, следовательно, по силе тока насыщения можно судить о количестве электронов, вылетающих из катода за единицу времени:

$$I_н = \frac{q_{max}}{t} = \frac{N|e|}{t},$$

где q_{max} — заряд, перенесенный фотоэлектронами за время t; N — количество «выбитых» электронов; e — элементарный заряд.

Если катод соединить с положительным полюсом источника тока, а анод — с отрицательным, то электрическое поле будет тормозить электроны, и при достижении определенного **задерживающего (запорного) напряжения** $U_з$ фототок прекращается. Согласно теореме о кинетической энергии работа электростатического поля равна изменению кинетической энергии фотоэлектрона ($A_{эл} = \Delta E_{k\,max}$):

$$|e|U_з = \frac{m_e v_{max}^2}{2},$$

где m — масса электрона; v_{max} — максимальная начальная скорость фотоэлектрона.

Уравнение, выражающее закон сохранения энергии в случае внешнего фотоэффекта **(уравнение Эйнштейна)**:

$$E_ф = A_{вых} + E_{k\,max}, \text{ или } h\nu = A_{вых} + \frac{m_e v_{max}^2}{2},$$

где $E_ф = h\nu$ — энергия фотона, $A_{вых}$ — работа выхода с поверхности данного вещества, $E_{k\,max}$ — максимальная кинетическая энергия вырванных фотоэлектронов.

Работа выхода $A_{вых}$ — это физическая величина, характеризующая металл и равная энергии, которую надо передать электрону для того, чтобы он смог преодолеть силы, которые удерживают его на поверхности этого металла.

Изменяя поочередно световой поток Ф, частоту ν падающего света и материал, из которого изготовлен катод, Столетов установил такие **законы внешнего фотоэффекта**:

I. *Количество фотоэлектронов N, которые излучает катод за единицу времени, прямо пропорционально интенсивности света* (рис. 214, *а*). Бóльшая интенсивность света означает большое количество фотонов, падающих на катод. Поглощаясь электронами вещества, фотоны способствуют излучению электронов.

II. *Максимальная начальная скорость фотоэлектронов увеличивается при увеличении частоты падающего света и не зависит от интенсивности света* (см. рис. 214, *а*). Электрон может поглотить только один фотон (больше — только при очень большой интенсивности света), поэтому максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно зависит от частоты падающего света (рис. 214, *б*).

III. *Для каждого вещества существует максимальная длина световой волны $\lambda_{max} = \lambda_{кр}$ (красная граница фотоэффекта), при которой начинается фотоэффект.* Облучение вещества световыми волнами, которые имеют большую длину, фотоэффекта не вызывают. Максимальная длина световой волны (минимальная частота) соответствует минимальной энергии фотона: если $h\nu < A_{вых}$, то электроны не будут вылетать из вещества. Условие

$$h\nu_{min} = \frac{hc}{\lambda_{max}} = A_{вых}$$

определяет красную границу фотоэффекта.

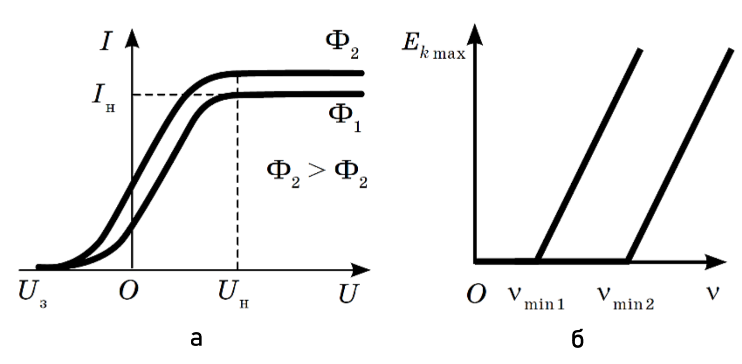


Рис. 214

Закон Столетова: увеличение энергии света неизменной λ увеличивает силу фототока насыщения $I_н$. Этот факт также объясняется *теорией Эйнштейна*: увеличение энергии пучка света длиной λ происходит за счет увеличения числа фотонов в пучке, который приводит к увеличению числа фотоэлектронов.

Фотоэффект используют в различных датчиках для систем управления и безопасности.

Фотоэлементы с внешним фотоэффектом — это вакуумные безынерционные приборы для получения фототоков.

Поток фотоэлектронов, которые свет вырывает из катода под действием электрического поля образует фототок, который замыкает электрическую цепь.

Фотоэлементы с внешним фотоэффектом применяются в фотореле и т. п.

Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом — это фотоэлементы с запирающим слоем.

Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом применяются в производстве солнечных батарей.

Фоторезисторы — полупроводники, у которых под действием света происходит внутренний фотоэффект и резко меняется их сопротивление.

§92 ДАВЛЕНИЕ СВЕТА. КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ

Световое давление — это давление, которое создает электромагнитная волна, падающая на поверхность тела (теоретически обосновал *Дж. Максвелл*, впервые установил и исследовал на практике *П. Н. Лебедев*).

Максвелл на основе электромагнитной теории света показал, что свет должен оказывать давление, и теоретически доказал, что часть фотонов отражается от поверхности, а часть — поглощается, поэтому давление света $p_{света}$, которое падает перпендикулярно к поверхности, определяется соотношением:

$$p_{света} = \frac{F_\perp}{S} = \frac{(1+R)Nh\nu}{cSt} = (1+R)\frac{W}{V} = (1+R)w,$$

где $F_\perp$ — сила светового давления; N — количество фотонов, падающих на поверхность площадью S за время t;

$E = h\nu$ — энергия каждого фотона; R — коэффициент отражения фотонов (RN фотонов отражается, $(1 - R)N$ фотонов — поглощается); $w = \frac{W}{V}$ — объемная плотность энергии падающего светового излучения.

Давление света на зеркальную поверхность в 2 раза больше, чем на черную (поглощающую) поверхность.

Если свет падает под определенным углом к поверхности, то давление света уменьшается.

В конце XVII в. почти одновременно возникли две различные теории, которые объясняли природу света, основываясь на законах *механики*: корпускулярная теория И. Ньютона и волновая теория X. Гюйгенса.

Корпускулярная теория света И. Ньютона	Волновая теория света X. Гюйгенса
Согласно корпускулярной теории Ньютона: *свет — это поток корпускул (частиц)*, излучаемых светящимися телами, причем движение световых корпускул подчиняется *законам механики*. Ньютону *принадлежит теория цвета*, согласно которой *белый свет является смесью разных цветов, а предметы кажутся цветными, поскольку определенные составляющие белого цвета они отражают интенсивнее других*.	Согласно волновой теории X. Гюйгенса: *свет — это продольные механические волны*, распространяющиеся в мировом эфире — гипотетически упругой среде, заполняющей все мировое пространство. Гюйгенс сформулировал принцип распространения световой волны, известный сегодня как **принцип Гюйгенса**: каждая точка среды, до которой дошла волна, становится источником вторичной волны, а огибающая вторичных волн дает положение волнового фронта в следующий момент времени.

Свет — это поток фотонов, а фотоны — это кванты электромагнитного излучения, имеющих одновременно и волновые, и корпускулярные свойства.

Кванты света — это особые частицы, энергия и импульс которых, в отличие от обычных материальных точек, определяются не через массу и скорость движения, а через волновые характеристики — частоту и длину волны.

Наличие у фотонов одновременно и корпускулярных, и волновых (интерференция, дифракция, поляризация света) характеристик приводит к тому, что свет проявляет свойства как непрерывных электромагнитных волн, так и отдельных частиц. Свойство материальных объектов, которое заключается в том, что в поведении одного объекта могут проявляться и корпускулярные, и волновые свойства, называется **корпускулярно-волновым дуализмом**. Все микрочастицы имеют свойства волны: чем меньше масса частицы, тем бóльшую длину волны (волны де Бройля) она имеет.

§93 ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Шкала (спектр) электромагнитных волн — непрерывная последовательность частот и длин электромагнитных волн, существующих в природе.

По способу излучения волн, относящихся к той или иной области спектра, различают: *низкочастотное излучение и радиоволны; инфракрасное излучение, видимый свет и ультрафиолетовое излучение; рентгеновское излучение; гамма-излучение*.

Все виды излучений являются электромагнитными волнами, а значит, распространяются в вакууме со скоростью света. С увеличением частоты (уменьшением длины) волны увеличивается проникающая способность электромагнитного излучения и постепенно на первый план выходят квантовые свойства излучения.

Низкочастотное излучение и **радиоволны** порождаются переменным электрическим током.

Инфракрасное (тепловое) излучение, **видимый свет** и **ультрафиолетовое излучение** испускают возбужденные атомы и молекулы веществ.

Инфракрасные лучи излучают любые тела, имеющие температуру, выше абсолютного нуля. Применяют в приборах ночного видения. Человеческий глаз не способен видеть инфракрасное излучение. Некоторые существа видят именно в инфракрасном диапазоне. Инфракрасное излучение обычно полезно для человека, но в больших дозах может вызвать головокружение, потерю сознания — тепловой и солнечный удары.

Видимый свет излучают достаточно нагретые тела, причем температура, при которой тело начинает излучать свет, зависит от вещества, из которого состоит это тело. Видимый белый свет разделяют на семь цветов: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий (индиго), фиолетовый.

Ультрафиолет излучают Солнце и другие звезды, электрические дуги, специальные кварцевые лампы. Человеческий глаз не реагирует на ультрафиолетовое излучение. Ультрафиолет обладает высокой химической активностью, поэтому в больших дозах отрицательно влияет на человека. Основное влияние ультрафиолетовых лучей химическое и биологическое (разрушение сетчатки глаза, выработки витамина D, разрушение бактерий).

Рентгеновское излучение (X-излучение) возникает во время резкого торможения быстрых электронов (тормозное излучение). В *рентгеновской трубке* (рис. 215) торможение электронов при их столкновении с анодом приводит к излучению рентгеновских лучей. Атомы анода вследствие возбуждения при бомбардировке быстрыми электронами также излучают рентгеновские лучи (характеристическое рентгеновское излучение). Рентгеновское излучение с относительно большой длиной волны (мягкое рентгеновское излучение) используют в медицине, жесткое рентгеновское излучение — в дефектоскопии.

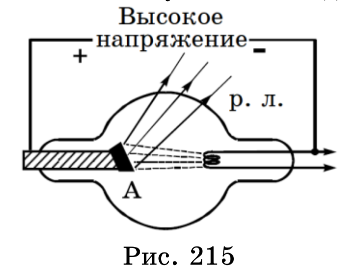


Рис. 215

Гамма (γ)-излучение выпускается возбужденными атомными ядрами во время ядерных реакций, радиоактивных превращений атомных ядер и преобразований элементарных частиц. γ-излучение используют в *дефектоскопии* (выявление дефектов внутри деталей); *радиационной химии* (например, в процессе полимеризации) *сельском хозяйстве* и *пищевой промышленности* (стерилизация пищи), *медицине* (стерилизация помещений, лучевая терапия). На организмы излучение оказывает мутагенное и канцерогенное воздействие.

С увеличением частоты электромагнитных волн:

- постепенно менее заметными становятся их волновые свойства, а квантовые свойства выступают на первый план;
- увеличивается проникающая способность излучения;
- увеличивается химическое воздействие, поскольку увеличивается энергия квантов.

РАЗДЕЛ V. АТОМ И АТОМНОЕ ЯДРО

ОСНОВЫ АТОМНОЙ ФИЗИКИ

§94 СТРОЕНИЕ АТОМА. ПОСТУЛАТЫ БОРА

Эксперименты, проведенные физиками в течение XIX в. (в частности, *Д. Дальтоном, М. Фарадеем, А. Беккерелем, Р. Милликеном* и др.) представили доказательства того, что атом имеет сложную структуру, и что в его состав входят электроны.

Модели строения атома

1. *Модель атома Томсона* (1903 г.) — «пудинг с изюмом»: атом имеет форму шара, положительный заряд атома распределен равномерно по всему объему шара, а отрицательно заряженные электроны вкраплены в ее середину.
2. *Модель атома Резерфорда* (1911 г.) — планетарная модель атома: атом состоит из ядра, в котором сосредоточена почти вся масса атома, но размеры которого очень малы по сравнению с размерами атома («вишневая косточка на футбольном поле»); вокруг ядра на сравнительно больших расстояниях от него движутся орбитами электроны.

Опыт Резерфорда

Резерфорд провел ряд опытов по рассеянию α-частиц при их прохождении через золотую фольгу (рис. 216). Для этого он поместил свинцовый контейнер с радиоактивным веществом, которое излучает α-частицы, и золотую фольгу в резервуар, из которого выкачан воздух и который изнутри покрыт люминофором, который «вспыхивает» при попадании α-частицы.

Серия опытов показала, что большое количество α-частиц проходили сквозь золотую фольгу, почти не отклоняясь, но некоторые из них отклонялись от начальной траектории на большие углы, и примерно одна из 20000 частиц отскакивала назад, будто наткнувшись на препятствие.

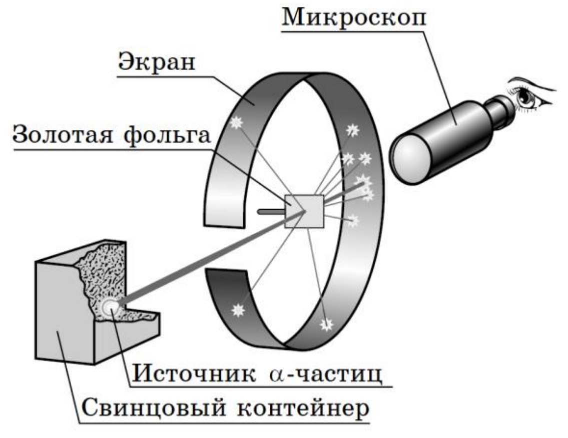


Рис. 216

Планетарная модель атома, блестяще пояснив рассеяние α -частиц, противоречила классическим законам электродинамики. Движение планетарной орбитой является движением с центростремительным ускорением, электрон должен излучать электромагнитные волны, а значит, тратить энергию и со временем упасть на ядро. Но этого не происходит, — атом является достаточно стабильным.

Развитием планетарной модели атома стали *постулаты Н. Бора*, согласно которым электроны в атоме могут находиться только на определенных («разрешенных») орбитах.

Первый постулат Бора (*о стационарных состояниях*): атомная система может находиться только в особых стационарных (квантовых) энергетических состояниях, каждому из которых соответствует определенное значение энергии; находясь в стационарном состоянии атом не излучает энергию.

Второй постулат Бора (*о квантовых скачках*): при переходе из одного стационарного энергетического состояния в другое атом излучает или поглощает квант электромагнитной энергии*:

$$h\nu = |E_k - E_m|,$$

где $h\nu$ — энергия кванта; E_k — энергия начального состояния атома; E_m — энергия состояния, в которое перешел атом.

Излучение кванта энергии (фотона) происходит в результате перехода атома из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией ($E_k > E_m$); в результате поглощения кванта атом переходит из состояния с меньшей энергией в состояние с большей энергией ($E_k < E_m$) (рис. 217).

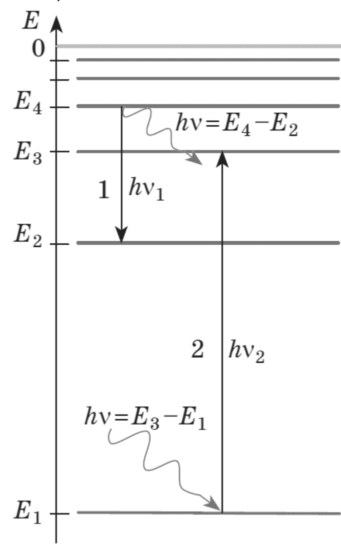


Рис. 217

Для атома действительно устойчивым является только стационарное состояние с низким уровнем энергии — **основное состояние**, в котором атом может находиться бесконечно долго. Все стационарные состояния атома, кроме основного, называют **возбужденными состояниями.**

Энергия любого стационарного состояния атома является отрицательной, поскольку обусловлена взаимодействием электронного облака и ядра атома, имеющих заряды противоположных знаков.

Электрон, как и свет, одновременно обладает свойствами волны и частицы. В 1924 г. французский физик

* Дополнительно к постулатам Бора был сформулирован **принцип Паули**, который «запрещает» пребывание двух электронов на орбитах с одинаковыми квантовыми числами. Правила заполнения многоэлектронных оболочек в атомах определяются принципом Паули и требованием минимизации энергии системы. Сходство химических свойств элементов обусловлена сходством строения их электронных оболочек. Квантовая механика дала теоретическое обоснование закона периодичности химических свойств атомов.

Луи де Бройль выдвинул гипотезу, согласно которой *корпускулярно-волновой дуализм характерен не только для фотонов, но и для любых других микрочастиц*.

Корпускулярно-волновой дуализм — универсальное свойство материальных объектов, которое заключается в том, что в поведении того же объекта могут проявляться и корпускулярные, и волновые черты.

Каждой подвижной частице соответствует определенная волна — **волна де Бройля**, — длину λ которой определяют по формуле:

$$\lambda = \frac{h}{p},$$

где p — импульс частицы, h — постоянная Планка.

Атомное ядро состоит из частиц двух видов: **протонов**, которые имеют положительный электрический заряд, и **нейтронов**, не имеющих заряда.

Протоны и нейтроны, входящие в состав ядра атома, называют **нуклонами**.

A — массовое число атома (округленная до целого относительная атомная масса), равное числу нуклонов в ядре, — нуклонное число.

Z — число протонов в ядре (порядковый номер элемента в периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева) — протонное (зарядовое) число.

$N = A - Z$ — число нейтронов в ядре.

Вид атомов, который характеризуется определенным значением протонного числа и определенным значением массового числа, называют **нуклидом** (рис. 218).

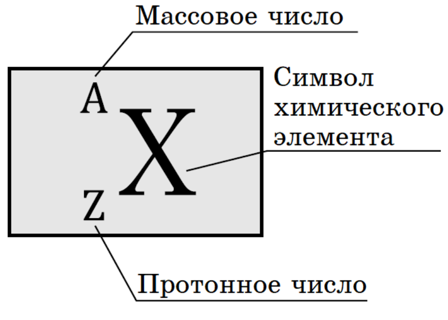


Рис. 218

Если разные нуклиды имеют одинаковое протонное число, то их химические свойства одинаковы — нуклиды принадлежат одному химическому элементу.

Разновидности атомов одного и того же химического элемента, ядра которых содержат одинаковое число протонов, но разное число нейтронов, называют **изотопами** («одинаковые по месту»).

Каждый химический элемент имеет несколько изотопов. Например: ^1_1H, ^2_1H, ^3_1H (Протий, Дейтерий, Тритий).

§95 ОСНОВЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА. ИНДУЦИРОВАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. ЛАЗЕРЫ

Атомы газообразных веществ в атомарном состоянии при повышенных температурах излучают электромагнитные волны четко определенных частот — им присущ **линейчатый спектр излучения**. Линейчатый спектр каждого элемента характеризуется индивидуальным для этого элемента набором частот.

Если газ облучают белым светом, на сплошном спектре наблюдаются черные полосы непосредственно на тех частотах, на которых происходит излучение данного элемента. Это — **линейчатый спектр поглощения**.

Спектры излучения газов в молекулярном состоянии отличаются от аналогичных спектров атомарных газов наличием большого количества близко расположенных линий, которые во время наблюдений часто сливаются в полосы (**полосатый спектр**).

Метод качественного и количественного определения состава вещества по его спектру называют **спектральным анализом.**

Исследование спектров излучения позволяет получить информацию о элементном составе веществ; исследования спектров поглощения звезд и других астрономических объектов, позволяет узнать их химический состав, температуру, давление, скорость и другие важные параметры.

Излучение, возникающее в результате спонтанного (самостоятельного) перехода атомов в состояние с низким уровнем энергии, называют **спонтанным излучением.**

Спонтанное излучение некогерентного, ведь каждый атом начинает и заканчивает излучать независимо от других. Однако в некоторых случаях переход атома из возбужденного состояния в основное может происходить вынужденно.

Излучение, которое возникает под влиянием внешней электромагнитной волны, называют **индуцированным (вынужденным) излучением.**

Индуцированное излучение инициируется не любой электромагнитной волной, а только волной, которая имеет частоту, равную *собственной частоте перехода*.

Собственная частота перехода — частота фотона, вследствие поглощения которого атом переходит из основного состояния в возбужденное.

Явление нетеплового свечения вещества, которое происходит после поглощения веществом энергии возбуждения, называют **люминесценцией**, а вещества, которые способны превращать поглощенную нетепловую энергию на световое излучение, — **люминофорами.** Примером применения люминесценции являются так называемые лампы дневного света.

Индуцированное излучение монохроматическое, когерентное, поляризованное, практически не рассеивается (можно получить очень узкий пучок света).

Квантовый генератор — это источник электромагнитных волн, действие которого строится на явлении вынужденного излучения. Квантовый генератор, который работает в диапазоне видимого света, называют **лазером** (рис. 219).

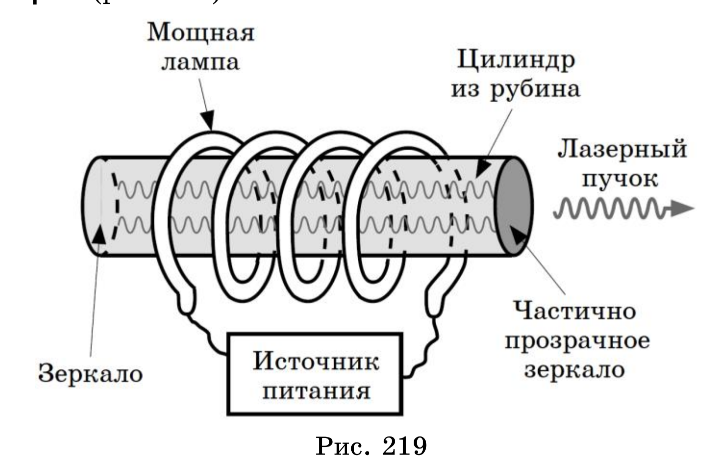


Рис. 219

Лазерные пучки используют: в науке — как качественные источники монохроматического когерентного света; в технике — для резки, сварки, сверления материалов; в хирургии и офтальмологии — как скальпель для «приварки» сетчатки. С помощью лазерного пучка осуществляют кабельную теле- и радиосвязь, получают голографические изображения.

ОСНОВЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

§96 ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ

Нуклоны притягиваются друг к другу благодаря **сильному взаимодействию**, которое гораздо сильнее электромагнитного взаимодействия.

Силы, которые действуют между протонами и нейтронами в ядре и обеспечивают существование атомных ядер, называют **ядерным силами**.

Основные свойства ядерных сил

1. Это *мощные силы*, которые существуют в природе, — они в 100–1000 раз больше электростатических сил отталкивания двух протонов, расположенных на близком расстоянии ($\sim 10^{-15}$ м);
2. Являются только *силами притяжения*;
3. *Являются близкодействующими*: измерения показали, что ядерные силы проявляются на расстояниях, которые примерно равны размеру нуклона ($\sim 10^{-15}$ м);
4. *Не зависят от заряда*: на одинаковом расстоянии силы, действующие между двумя протонами, между двумя нейтронами или между протоном и нейтроном, одинаковы;
5. *Имеют свойство насыщения*: нуклон оказывается способным к ядерному взаимодействию одновременно только с небольшим количеством расположенных рядом нуклонов.

Ядерные силы намного сильнее кулоновских, поэтому, чтобы «разделить» ядро на отдельные нуклоны, необходимо выполнить работу, то есть потратить определенную энергию.

Энергию, необходимую для полного расщепления ядра на отдельные нуклоны, или энергию, которая выделится при образовании ядра из свободных нуклонов, называют **энергией связи атомного ядра** ($E_{св}$).

По закону сохранения энергии такая же энергия должна выделиться при образовании ядра, поэтому энергия и масса связаны формулой Эйнштейна:

$$E = mc^2.$$

Масса любого ядра меньше суммы масс нуклонов, из которых это ядро состоит:

$$m_я < Zm_p + Nm_n,$$

где $m_я$ — масса ядра; Zm_p — масса протонов в ядре; Nm_n — масса нейтронов в ядре.

Разницу массы нуклонов, составляющих ядро, и массы ядра называют **дефектом масс**:

$$\Delta m = (Zm_p + Nm_n) - m_я$$

Поскольку при образовании ядра масса системы уменьшается, то энергию, которая выделится при образовании ядра, а следовательно, и энергию связи можно определить по формуле:

$$E_{св} = \Delta mc^2 = [(Zm_p + Nm_n) - m_я]c^2$$

Энергия связи ядра чаще всего измеряется в МэВ:
1 МэВ $= 10^6$ эВ $= 10^6 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж $= 1{,}6 \cdot 10^{-13}$ Дж.

$$E_{св} = \Delta mk,$$

где $k = 931{,}5\ \frac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}}$ — постоянная величина.

Удельная энергия связи f — это физическая величина, характеризующая ядро определенного нуклида и численно равная энергии связи, приходящейся на один нуклон ядра:

$$f = \frac{E_{св}}{A},$$

где $E_{св}$ — энергия связи, A — число нуклонов в ядре (массовое число).

Элементы, расположенные в средней части таблицы Д. И. Менделеева, имеют большую удельную энергию связи ядер. Энергия освобождается при соединении легких ядер или при разделении тяжелых (рис. 220).

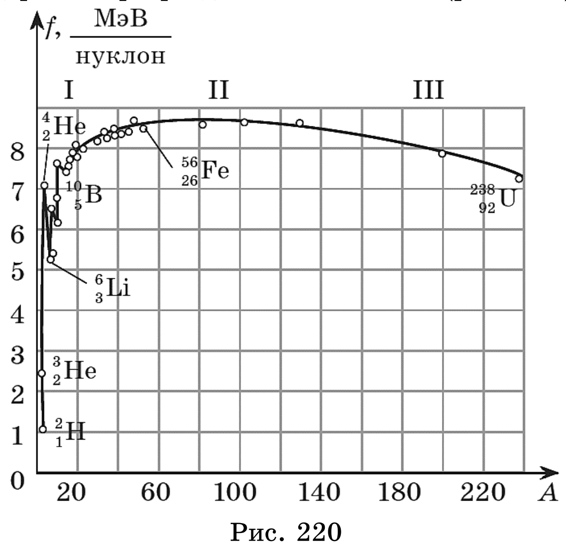


Рис. 220

Участок I (*легкие ядра*) — кривая зависимость постепенно поднимается, то есть удельная энергия связи увеличивается; это означает, что в случае синтеза (объединения) легких ядер в более тяжелые будет выделяться энергия.

Участок II (*ядра элементов средней части периодической системы химических элементов*) почти ровная, на этом участке кривая достигает слабого максимума, который означает, что элементы этой части наиболее устойчивы.

Участок III (*тяжелые ядра*) — удельная энергия связи плавно уменьшается, поэтому ядра становятся менее устойчивыми и во время разделения этих ядер будет высвобождаться энергия.

§97 РАДИОАКТИВНОСТЬ

Радиоактивность — явление самопроизвольного превращения неустойчивого изотопа химического элемента в другой изотоп.

Радионуклиды — нуклиды, ядра которых имеют способность к радиоактивному излучению.

Естественную радиоактивность открыл *А. Беккерель* (1896 г.), который установил, что соль урана испускает излучение, которое засвечивает фотопленку, завернутую в черную бумагу, и ионизируют воздух.

Исследование радиоактивного излучения продолжили супруги *М. Складовская-Кюри* и *П. Кюри*. Они обнаружили радиоактивные свойства у Тория и открыли новые радиоактивные элементы — Полоний и Радий.

Опыты по изучению радиоактивного излучения показали, что это излучение не является однородным. В магнитном поле радиоактивное излучение разделяется на три составляющие: α-, β-, γ-излучения (рис. 221).

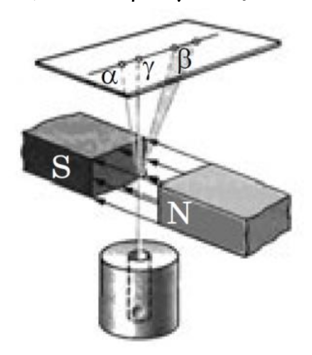


Рис. 221

1. *α-излучение* — положительно заряженные тяжелые частицы (ядра атомов Гелия).
2. *β-излучение*: β^--излучение — отрицательно заряженные легкие частицы (быстрые электроны), β^+-излучение — положительно заряженные легкие частицы (быстрые позитроны).
3. *γ-излучение* — высокочастотные электромагнитные волны.

Излучая α- или β-частицы, исходное ядро (*материнское ядро*) преобразуется в ядро атома другого элемента (*дочернее ядро*); α- и β-распады могут сопровождаться γ-излучением. Установлено, что радиоактивные преобразования ядер подчиняются так называемым **правилам смещения (правилам Содди)**:

1) При α-распаде количество нуклонов в ядре уменьшается на 4, протонов — на 2, поэтому образуется ядро элемента, порядковый номер которого на 2 единицы меньше порядкового номера исходного элемента:
$${}^{A}_{Z}X \to {}^{4}_{2}He + {}^{A-4}_{Z-2}Y.$$
2) При β^--распаде количество нуклонов в ядре не меняется, а количество протонов увеличивается на 1, поэтому образуется ядро элемента, порядковый номер которого на единицу больше порядкового номера исходного элемента:
$${}^{A}_{Z}X \to {}^{0}_{-1}e + {}^{A}_{Z+1}Y.$$
3) При β^+-распаде количество нуклонов в ядре не меняется, а количество протонов увеличивается на 1, поэтому образуется ядро элемента, порядковый номер которого на единицу больше порядкового номера исходного элемента:
$${}^{A}_{Z}X \to {}^{0}_{+1}e + {}^{A}_{Z-1}Y.$$

Во время β^--распада кроме электрона из ядра вылетает еще одна частица — **антинейтрино** $\left({}^{0}_{0}\tilde{\nu}_e\right)$, а во время β^+-распада кроме позитрона — **нейтрино** $\left({}^{0}_{0}\nu_e\right)$. Из-за очень маленькой массы и отсутствия заряда эти частицы очень слабо взаимодействуют с веществом, и это затрудняет их обнаружение в эксперименте (см. § 100).

4) При γ-распаде происходит потеря энергии и переход ядер, оказавшихся в возбужденном состоянии, в стационарное состояние, которые при этом излучают квант электромагнитного излучения высокой частоты (γ-квант):
$${}^{A}_{Z}X^* \to {}^{0}_{0}\gamma + {}^{A}_{Z}X,$$
где ${}^{A}_{Z}X^*$ — ядро атома в возбужденном состоянии.

Период полураспада T — это физическая величина, которая характеризует радионуклид и равна времени, в течение которого распадается половина имеющегося количества ядер данного радионуклида.

Единица периода полураспада в СИ — **секунда** (с).

Активность A **радионуклидного источника** — физическая величина, численно равная количеству распадов ΔN, которые происходят в данном радионуклиде источнике за единицу времени Δt:

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t}$$

Единица активности в СИ — **беккерель** (Бк).

1 Бк — это активность такого радиоактивно источника, в котором за 1 с происходит 1 акт распада:

Внесистемная единица — **кюри** (Ки):

$$1 \text{ Ки} = 3{,}7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}.$$

Если образец содержит атомы только одного радионуклида, то активность этого образца можно определить по формуле:

$$A = \lambda N,$$

где N — число атомов радионуклида в образце на данный момент времени; λ — постоянная радиоактивно распада радионуклида (физическая величина, являющаяся характеристикой радионуклида и связанная с периодом полураспада соотношением: $\lambda = \frac{\ln 2}{T} \approx \frac{0{,}69}{T}$, $[\lambda] = \text{с}^{-1}$).

Закон радиоактивного распада (рис. 222):

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}},$$

где N — количество ядер радионуклида, которые остались в образце через время t; N_0 — начальное количество ядер; T — период полураспада; t — время распада.

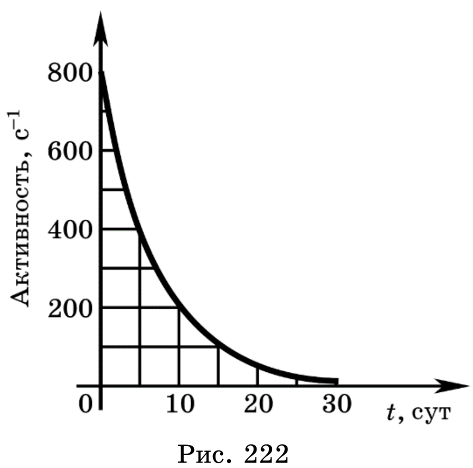


Рис. 222

§98 ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ядерная реакция — это превращение атомного ядра в ходе взаимодействия с другим ядром или элементарной частицей.

Ядерные реакции протекают следующим образом: ядро захватывает частицу (или другое ядро), поглощает их энергию, переходит в неустойчивое состояние и распадается.

Во время ядерных реакций выполняются следующие законы сохранения:

- закон сохранения электрического заряда;
- закон сохранения количества нуклонов;
- закон сохранения энергии;
- закон сохранения импульса.

Первую ядерную реакцию совершил *Э. Резерфорд* (1919 г.). Бомбардируя α-частицами ядра атома Нитрогена, он получил протоны (ядра атома Гидрогена):

$$^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \to {}^{17}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}.$$

Радиоактивные изотопы — это разновидности атомов одного и того же химического элемента, ядра которых могут произвольно превращаться в ядра других элементов с излучением микрочастиц и γ-лучей.

Первый искусственный радиоактивный изотоп — изотоп фосфора $\left({}^{30}_{15}\mathrm{P}\right)$ — получили супруги *Ирен и Фредерик Жолио-Кюри* в 1934 г. Облучая алюминий α-частицами, они наблюдали излучение нейтронов:

$$^{27}_{13}\mathrm{Al} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \to {}^{30}_{15}\mathrm{P} + {}^{1}_{0}n.$$

Однако одновременно с излучением нейтронов излучались и позитроны. Наличие позитронов означало, что полученное ядро Фосфора-30 было β^+-радиоактивным:

$$^{30}_{15}\mathrm{P} \to {}^{30}_{14}\mathrm{Si} + {}^{0}_{+1}e + {}^{0}_{0}\nu_e.$$

Энергию, которая высвобождается в результате ядерной реакции, называют **энергетическим выходом** ΔE **ядерной реакции**:

$$\Delta E = \Delta mc^2, \text{ или } \Delta E = \Delta mk,$$

где $\Delta m = m_1 - m_2$ (здесь m_1 — масса частиц до реакции, m_2 — масса частиц после реакции), $k = 931{,}5\ \frac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}}$.

Если $\Delta m > 0$, то реакция протекает с выделением энергии — *экзотермическая реакция*, если $\Delta m < 0$, то реакция протекает с поглощением энергии — *эндотермическая реакция*.

Радиоактивные α-, β-, γ-излучения оказывают значительное воздействие на организмы. Попадая в вещество, радиоактивное излучение передает ему энергию. В результате поглощения этой энергии некоторые атомы и молекулы вещества ионизируются (рис. 223) — их химическая активность изменяется и образуются новые, чрезвычайно активные химические соединения.

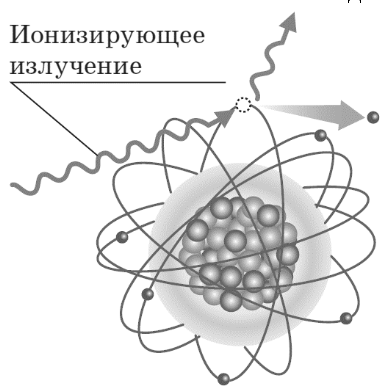


Рис. 223

Чем больше поглощенная веществом энергия излучения, тем большее воздействие оказывает это излучение на вещество.

Отношение энергии E ионизирующего излучения, поглощенной веществом, к массе m этого вещества называют **поглощенной дозой ионизирующего излучения** (D):

$$D = \frac{E}{m}$$

Единица поглощенной дозы в СИ — **грей** (Гр).

1 Гр — это такая поглощенная доза ионизирующего излучения, при которой веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения, равная 1 Дж (Гр = Дж/кг).

Существует также внесистемная единица поглощенной дозы — **рад** (поглощенная доза радиации): 1 Гр = 100 рад.

Биологическое действие на организмы разных видов излучения неодинаково при одинаковой поглощенной дозе.

Физическую величину, характеризующую биологическое действие поглощенной дозы ионизирующего излучения, называют **эквивалентной дозой ионизирующего излучения** (H)[24]:

$$H = K \cdot D$$

где D — поглощенная доза ионизирующего излучения; K — коэффициент качества, характеризующий опасность данного вида излучения: чем больше коэффициент качества, тем опаснее излучение.

Единица эквивалентной дозы в СИ — **зиверт** (Зв).

Существует также внесистемная единица эквивалентной дозы — **бэр**: 1 бэр = 0,01 Зв.

Физическое действие любого ионизирующего излучения на вещество связано прежде всего с ионизацией атомов и молекул. Поэтому была введена физическая величина, которая определяется ионизационным действием излучения. Эту величину называют *экспозиционной дозой ионизирующего излучения*.

Экспозиционная доза ионизирующего излучения ($D_{\text{эксп}}$) определяется суммарным зарядом ионов того или иного знака, возникающих под действием излучения в 1 кг сухого воздуха:

$$D_{\text{эксп}} = \frac{q}{m},$$

где q — суммарный заряд ионов, возникающих под действием излучения в сухом воздухе массой m.

Единица экспозиционной дозы в СИ — **кулон на килограмм** (Кл/кг).

Существует также внесистемная единиц экспозиционной дозы — **рентген** (Р): $1\ \text{Р} = 2{,}58 \cdot 10^{-4}\ \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$.

Доза ионизирующего излучения зависит от времени облучения: чем больше время облучения, тем больше доза ионизирующего излучения, то есть доза излучения накапливается со временем.

Отношение дозы ионизирующего излучения D ко времени облучения t называют **мощностью дозы** P_D **ионизирующего излучения**:

$$P_D = \frac{D}{t}$$

Единица мощности дозы в СИ — грей в секунду (Гр/с), или рентген в секунду (Р/с), или зиверт в секунду (Зв/с).

Приборы регистрации ионизирующего излучения

- Слой фотоэмульсии. Быстрая заряженная частица, двигаясь в слое фотоэмульсии, содержащей кристаллы AgBr, при движении вырывает электроны из некоторых ионов Брома. Во время проявления в

[24] Для обозначения эквивалентной дозы ионизирующего излучения используют также символ $D_{\text{экв}}$.

измененных кристаллах образуются «зерна» металлического серебра — в слое фотоэмульсии проступают следы (треки) первичной частицы и всех заряженных частиц, возникших вследствие ядерных взаимодействий.

- Сцинтилляционный счетчик — детектор сцинтилляций — световых вспышек, которые происходят в определенных веществах вследствие ударов заряженных частиц. Именно такие счетчики использовал Э. Резерфорд в своем опыте по определению строения атомов (см. § 94).
- Камера Вильсона (рис. 224, *а*) — это трековый детектор. Она представляет собой емкость, заполненную паром спирта или эфира. Когда поршень *резко* опускают, то в результате адиабатного расширения пар охлаждается и становится *перенасыщенным*. Когда в перенасыщенный пар попадает заряженная частица, на своем пути она ионизируют молекулы пара — полученные ионы становятся центрами конденсации. Цепочка капель сконденсированного пара, который образуется вдоль траектории движения частицы (трек частицы), снимают на камеру или фотографируют (рис. 224, *б*).

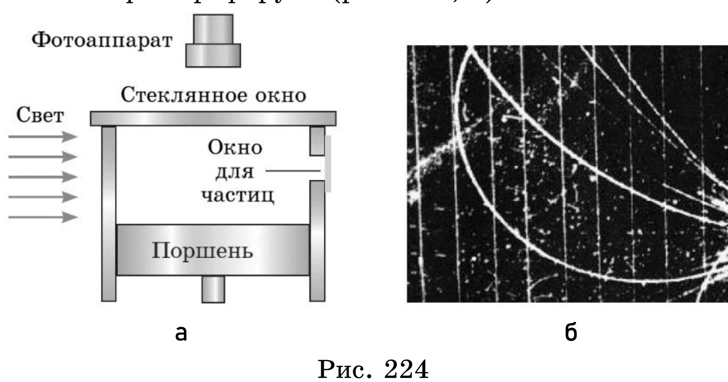


Рис. 224

- Пузырьковая камера тоже является трековым детектором. Принцип ее работы подобный камере Вильсона, а отличие заключается в том, что рабочим телом в пузырьковой камере является *перегретая жидкость*: ионы, которые возникают вдоль траектории движения частицы, становятся центрами кипения — образуется цепочка пузырьков. В перегретой перед испытанием жидкости (путем *резкого* уменьшения давления) исследуемая частица образует *пузырьковый трек*.
- Газоразрядный счетчик Гейгера — Мюллера и ионизационная камера работают по одному принципу: рабочее тело — газ — размещено в электрическом поле с высоким напряжением; заряженная частица, пролетает сквозь газ, ионизируют его, и в устройстве возникает газовый разряд.
- В других видах ионизационных камер и в газоразрядных счетчиках фиксируется импульс тока — это *импульсные детекторы*. Именно импульсными являются детекторы дозиметров — приборов для измерения дозы ионизирующего излучения, полученного прибором за некоторый интервал времени.

§99 ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Ядерные реакции особенно легко обусловлены медленными нейтронами, которые из-за отсутствия заряда свободно проникают в атомные ядра и вызывают их преобразования.

Например, ядро Урана (тяжелое ядро), поглощая нейтрон, «лопается» — распадается на два осколка (на два легких ядра). Эта реакция сопровождается освобождением нейтронов, которые содержатся в ядре, а те, в свою очередь, могут вызвать деление других ядер урана — будет происходить *цепная ядерная реакция*, сопровождающаяся выделением энергии (225):

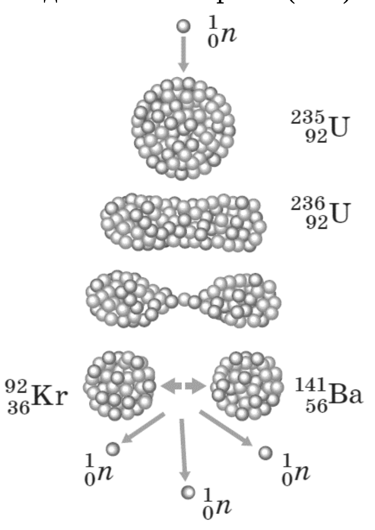


Рис. 225

Цепная ядерная реакция — это реакция деления тяжелых ядер, при которой образуются нейтроны, необходимые для дальнейшего протекания этой реакции.

Цепная ядерная реакция сопровождается выделением огромного количества энергии, так как образуются ядра с большей удельной энергией связи.

Коэффициент размножения нейтронов — это отношение числа нейтронов, освобожденных при делении ядер, к числу нейтронов, вызывающих деление ядер в данной массе ядерного горючего.

Для протекания цепной реакции необходимо, чтобы коэффициент размножения нейтронов в данной массе урана был $k \geqslant 1$.

Цепная реакция в $^{235}_{92}\mathrm{U}$ и $^{239}_{94}\mathrm{Pu}$ происходит в атомных бомбах, где критическая масса радиоактивного вещества обусловливает $k \geqslant 1{,}01$, то есть ядерный взрыв.

Критическая масса — минимальное количество делящегося вещества, необходимого для начала цепной реакции деления.

В реакторах на атомных электростанциях происходит управляемая ядерная реакция ($k = 1$).

Процесс преобразования ядерной энергии в тепловую осуществляется в **ядерных реакторах** — устройствах, предназначенных для осуществления управляемой цепной реакции деления, которая всегда сопровождается выделением энергии.

Первый ядерный реактор построен в США под руководством *Э. Ферми*.

Ядерное топливо (уран или плутоний) размещают внутри тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) (рис. 226).

Поскольку реакторы работают на медленных (тепловых) нейтронах, то между ТВЭЛами располагают замедлитель нейтронов (графит, или тяжелая вода). Разделение тяжелых ядер, которые происходят внутри ТВЭЛов, сопровождается выделением тепловой энергии, которая передается теплоносителю. Управление ядерной реакцией осуществляется при помощи управляющих стержней, которые хорошо поглощают нейтроны.

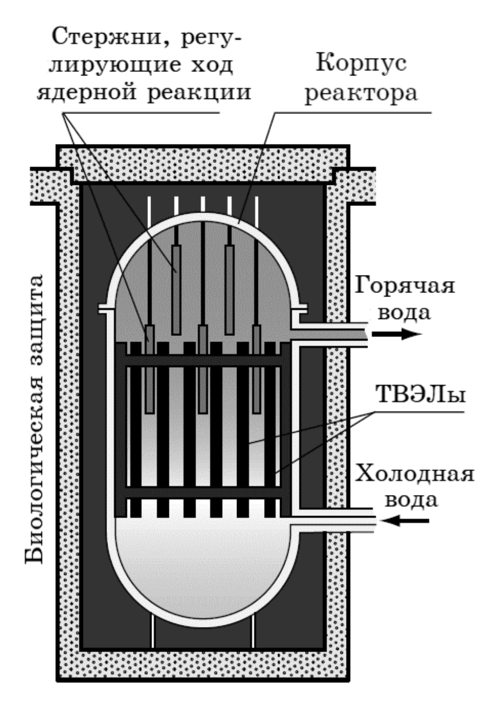


Рис. 226

Выделение энергии может происходить как при делении тяжелых ядер, так и во время объединения (синтеза) некоторых легких ядер.

Реакцию слияния легких ядер в более тяжелые ядра, происходящая при очень высоких температурах (более 10^7 °C) и сопровождается выделением энергии, называют **термоядерным синтезом**. Энергия, выделяющаяся при этом, — это кинетическая энергия образованных ядер и частиц и энергия γ-излучения:

$$ {}_1^2\mathrm{H} + {}_1^3\mathrm{H} \to {}_2^4\mathrm{He} + {}_0^1n, $$

выделяется 17,6 МэВ;

$$ {}_3^7\mathrm{Li} + {}_1^1\mathrm{H} \to 2 \cdot {}_2^4\mathrm{He}, $$

выделяется 14,6 МэВ.

Высокие температуры, то есть большие кинетические энергии ядер, необходимы для того, чтобы преодолеть силы электрического отталкивания ядер.

В природе термоядерные реакции происходят в недрах звезд, где различные нуклиды Гидрогена объединяются в ядра атомов Гелия.

§100 ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Частицы, которым на сегодняшний день наука не может приписать определенного внутреннего строения, называют **элементарными**.

Открыто 38 элементарных частиц и более 300 **резонанс-частиц** (короткоживущие частицы со средней продолжительностью жизни 10^{-22}–10^{-23} с).

Теоретические разработки в области квантовой механики позволили предсказать существование многих элементарных частиц (позитрона, нейтрино), которые затем были открыты в результате экспериментальных исследований.

Позитрон является античастицей электрона. Электрон (β^--частица) и позитрон (β^+-частица) могут образовываться внутри ядра:

- электрон образуется в результате преобразования нейтрона — в результате появляются протон, электрон и антинейтрино (рис. 227, *а*):

$$ {}_0^1n \to {}_1^1p + {}_{-1}^{\ 0}e + {}_0^0\tilde{\nu}_e. $$

- позитрон образуется в результате преобразования протона — в результате появляются нейтрон, позитрон и нейтрино (рис. 227, *б*):

$$ {}_1^1p \to {}_0^1n + {}_{+1}^{\ 0}e + {}_0^0\nu_e. $$

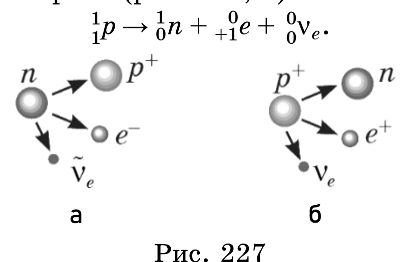


Рис. 227

Классификация элементарных частиц

1. *Фотоны* ($m_0 = 0$): γ.
2. *Лептоны* (легкие): e^-, e^+, ν_e, $\tilde{\nu}_e$, μ^+, μ^-, ν_μ, $\tilde{\nu}_\mu$.
3. *Мезоны* (средние): π^-, π^+, π^0, k^+, k^-, k^0 (k_1^0, k_2^0).
4. *Барионы* (тяжелые): нуклоны p, n и гипероны.

Каждая частица имеет свою *античастицу*, то есть частичку той самой массы покоя, но с некоторыми противоположными квантовыми свойствами (e^- и e^+, ν_e и $\tilde{\nu}_e$, p и p^- и т. д.).

Фотон и π^0-мезон античастиц не имеют.

Стабильные частицы (их девять) — частицы, которые живут в свободном состоянии сколь угодно долго: γ, e^-, e^+, p, p^-, ν_e, $\tilde{\nu}_e$, ν_μ, $\tilde{\nu}_\mu$. Остальные нестабильные.

Например, ${}_0^1n$ стабильный в ядре, а в свободном состоянии его средняя продолжительность жизни 15 мин, после чего нейтрон превращается в стабильные частицы (см. рис. 227, *а*).

При любом превращении элементарных частиц выполняются законы сохранения массы, энергии, электрического заряда, импульса, момента импульса.

Для объяснения экспериментов с рассеяния на адронах (протонах и нейтронах) высокоэнергетических электронов была выдвинута гипотеза о существовании нового типа элементарных частиц — **кварков**. Отличительная черта кварков — дробный заряд.

Космические лучи высоких и сверхвысоких энергий были и остаются надежным инструментом исследователей для получения данных о строении микромира.

ОСНОВЫЕ ФОРМУЛЫ В ФИЗИКЕ

КИНЕМАТИКА

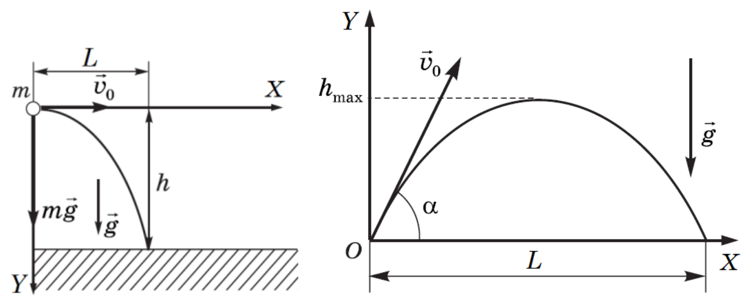
МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

Величина	Формулы	Единицы
Уравнение изменения со временем t проекции перемещения s_x; v_x — проекция скорости движения	$s_x = v_x t$	м
Координата x равномерного прямолинейного движения тела; x_0 — начальная координата тела	$x = x_0 + s_x$ $x = x_0 + v_x t$	м
Правило сложения перемещений; $\vec{s}$ — перемещение в неподвижной системе отсчета, $\vec{s}_1$ — перемещение в подвижной системе отсчета, $\vec{s}_2$ — перемещение подвижной системы отсчета относительно неподвижной	$\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2$	м
Правило сложения скоростей; $\vec{v}$ — скорость в неподвижной системе отсчета, $\vec{v}_1$ — скорость в подвижной системе отсчета, $\vec{v}_2$ — скорость подвижной системы отсчета относительно неподвижной	$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$
Средняя векторная скорость; $\vec{s}$ — общее перемещение тела за время t, состоящее из перемещений $\vec{s}_1, \vec{s}_2, ..., \vec{s}_n$, происходивших за интервалы времени $t_1, t_2, ..., t_n$	$\vec{v}_{\text{ср}\,s} = \frac{\vec{s}}{t} = \frac{\vec{s}_1 + \vec{s}_2 + ... + \vec{s}_n}{t_1 + t_2 + ... + t_n}$	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$
Средняя путевая скорость; l — общий путь, пройденный телом за время t; $l_1, l_2, ..., l_n$ — длины участков траектории, которые тело проходило за интервалы времени $t_1, t_2, ..., t_n$	$v_{\text{ср}\,l} = \frac{l}{t} = \frac{l_1 + l_2 + ... + l_n}{t_1 + t_2 + ... + t_n}$	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$
Мгновенная скорость движения; $\Delta\vec{s}$ — перемещение тела за малый интервал времени Δt	$\vec{v} = \frac{\Delta\vec{s}}{\Delta t}$	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$

РАВНОУСКОРЕННОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ

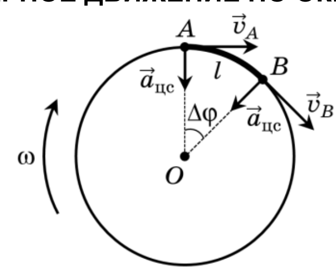
Величина	Формулы	Единицы
Ускорение $\vec{a}$; $\Delta\vec{v} = \vec{v} - \vec{v}_0$ — изменение скорости движения тела за малый интервал времени Δt	$\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}$	$\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$
Уравнение проекции скорости v_x при равноускоренном движении; v_{0x} и a_x — соответственно начальная скорость и ускорение тела	$v_x = v_{0x} + a_x t$	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$
Уравнения проекции перемещения s_x на ось OX	$s_x = \frac{v_x + v_{0x}}{2} t$ $s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$ $s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}$	м
Координата x равноускоренного прямолинейного движения; x_0 — начальная координата тела	$x = x_0 + s_x$ $x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$	м

КРИВОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ



Величина	Формулы	Единицы
Линейная скорость v при равномерном движении; l — путь, пройденный телом за время t	$v = \frac{l}{t}$	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$
Движение тела, брошенного горизонтально; v_0 — модуль начальной скорости движения; g — ускорение свободного падения; L — горизонтальная дальность полета; v — модуль результирующей скорости; h — высота падения тела	$L = v_0 t = v_0\sqrt{\frac{2h}{g}}$	м
	$h = \frac{gt^2}{2}$	м
	$v = \sqrt{v_0^2 + (gt)^2}$	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$
Движение тела, брошенного под углом α *к горизонту*; v_0 — модуль начальной скорости движения; L — дальность полета тела; h_{max} — максимальная высота подъема тела; $t_\text{п}$ и t — соответственно время подъема и время полета тела	$L = v_0 \cos\alpha\, t$ $L = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$	м
	$h_{max} = \frac{v_0^2 \sin^2\alpha}{2g} = v_0 \sin\alpha \cdot t_\text{п} - \frac{g t_\text{п}^2}{2}$	м
	$t = 2t_\text{п} = \frac{2v_0 \sin\alpha}{g}$	с

РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ



Величина	Формулы	Единицы
Период вращения T; N — число оборотов за интервал времени t	$T = \frac{t}{N}$	с
Частота вращения n	$n = \frac{N}{t} = \frac{1}{T}$	$\frac{1}{\text{с}}$
Угловая скорость ω; Δφ — угол поворота радиуса за интервал времени Δt	$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi n$	$\frac{\text{рад}}{\text{с}}$; $\frac{1}{\text{с}}$
Линейная скорость v; R — радиус окружности	$v = \frac{l}{t} = \frac{2\pi R}{T} = \omega R$	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$
Центростремительное ускорение $a_{\text{цс}}$	$a_{\text{цс}} = \omega v = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R$	$\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$

ДИНАМИКА

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕЛ. ЗАКОНЫ НЬЮТОНА

Величина	Формулы	Единицы
Равнодействующая $\vec{F}$ сил $\vec{F}_1, \vec{F}_2, ..., \vec{F}_n$, приложенных к материальной точке	$\vec{F}=\vec{F}_1+\vec{F}_2+...+\vec{F}_n$	Н
Масса тела	$m = \rho V$	кг
Отношение масс и модулей ускорений тел, которые взаимодействуют	$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}$	
Первый закон Ньютона	$F=0$; $\vec{v} = \overrightarrow{\text{const}}$	
Второй закон Ньютона	$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$	$\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$
Третий закон Ньютона; $\vec{F}_{1,2}$ — сила, с которой второе тело действует на первое; $\vec{F}_{2,1}$ — сила, с которой первое тело действует на второе	$\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}$	
Закон всемирного тяготения; m_1 и m_2 — массы взаимодействующих тел, r — расстояние между телами, G — гравитационная постоянная	$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$	Н
Сила тяжести $F_т$; $M_З$ — масса Земли, g — ускорение свободного падения, $r=R+h$ — расстояние от центра Земли до тела	$F_т = G\frac{mM_З}{r^2} = mg$	Н
Ускорение свободного падения g на поверхности Земли	$g = G\frac{M_З}{r^2}$	$\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$
Орбитальная скорость; если $r=R$ ($h=0$), то $v_I \approx 7900$ м/с — первая космическая скорость	$v = \sqrt{G\frac{M_З}{r}} = \sqrt{gr}$	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$
Сила упругости $F_{упр}$ (закон Гука); k — жесткость тела, x — смещение тела	$F_{упр} = k\|x\|$	Н
Жесткость системы параллельно соединенных пружин	$k = k_1 + k_2 + ... + k_n$	$\frac{\text{Н}}{\text{м}}$
Жесткость системы последовательно соединенных пружин	$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + ... + \frac{1}{k_n}$	$\frac{\text{Н}}{\text{м}}$
Сила трения скольжения $F_{тр.\,ск}$ *(закон Амонтона — Кулона)*; μ — коэффициент трения, N — сила нормальной реакции опоры	$F_{тр.\,ск} = \mu N$	Н
Сила трения покоя	$F_{тр} \leqslant \mu N$	Н
Вес тела P, которое движется равномерно прямолинейно или не двигается	$P = mg$	Н
Вес тела $\vec{P}$, движущегося с ускорением $\vec{a}$	$\vec{P} = m(\vec{g} - \vec{a})$	Н

РАВНОВЕСИЕ ТЕЛА

Величина	Формулы	Единицы
Динамическое условие равновесия	$\begin{cases} \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + ... + \vec{F}_n = 0, \\ M_1 + M_2 + ... + M_n = 0 \end{cases}$	
Момент силы M; l — плечо силы. Знак «+» соответствует моменту силы, стремящейся вращать тело против хода часовой стрелки, знак «−» — по ходу часовой стрелки	$M = \pm Fl$	Н · м

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

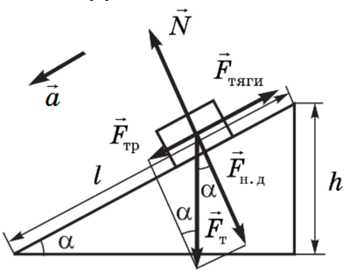
ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

Величина	Формулы	Единицы
Импульс тела; m — масса тела, v — скорость движения тела	$\vec{p} = m\vec{v}$	$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$
Импульс силы; Δt — время действия силы F	$\vec{F}\Delta t$	Н · с
Второй закон Ньютона в импульсной форме	$\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p}$	
Закон сохранения импульса	$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + ... + \vec{p}_n = \overrightarrow{\text{const}}$	$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$

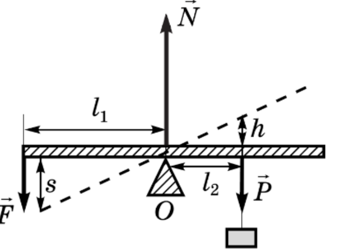
МЕХАНИЧЕСКАЯ РАБОТА. МОЩНОСТЬ. ЭНЕРГИЯ. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Величина	Формулы	Единицы
Механическая работа; α — угол между направлением силы $\vec{F}$ и направлением перемещения $\vec{s}$	$A = \vec{F} \cdot \vec{s} = Fs\cos\alpha$	Дж
Мощность; A — работа тела за время t	$N = \frac{A}{t} = Fv\cos\alpha$	Вт
Кинетическая энергия тела, движущегося со скоростью $\vec{v}$	$E_k = \frac{mv^2}{2}$	Дж
Теорема о кинетической энергии	$A = \Delta E_k$	Дж
Потенциальная энергия тела в поле тяготения; h — высота тела над выбранным нулевым уровнем	$E_p = mgh$	Дж
Потенциальная энергия упруго деформированного тела; k — жесткость тела, x — смещение тела	$E_p = \frac{kx^2}{2}$	Дж
Работа силы тяжести или упругости (теорема о потенциальной энергии)	$A = -\Delta E_p$	Дж
Полная механическая энергия системы	$E = E_k + E_p$	Дж
Закон сохранения механической энергии в замкнутых системах	$E_{k0} + E_{p0} = E_k + E_p$	Дж
Закон сохранения *полной* механической энергии при неупругих взаимодействиях; $\Delta U = Q$ — энергия, которая перешла в другие формы	$E_0 = E + \Delta U$	Дж

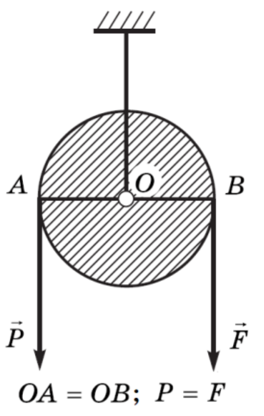
КПД ПРОСТЫХ МЕХАНИЗМОВ



Наклонная плоскость

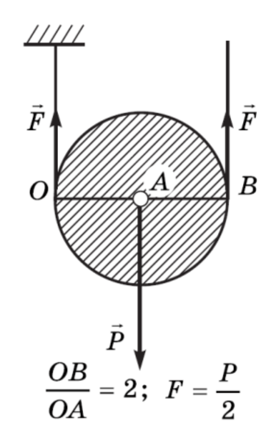


Рычаг



$OA = OB$; $P = F$

Неподвижный блок



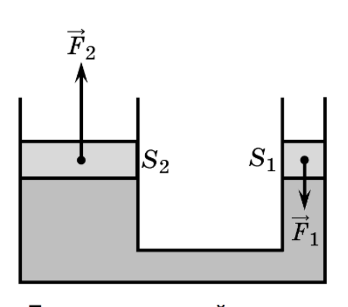
$\frac{OB}{OA} = 2$; $F = \frac{P}{2}$

Подвижный блок

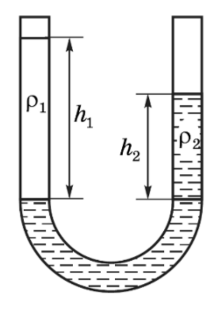
Величина	Формулы	Единицы
Коэффициент полезного действия (КПД) механизма η; $A_п$ ($N_п$) — полезная работа, $A_з$ ($N_з$) — полная (затраченная) работа	$\eta = \frac{A_п}{A_з} = \frac{N_п}{N_з}$	
КПД наклонной плоскости	$\eta = \frac{A_п}{A_з} = \frac{F_т h}{F_{тяги} l}$	
КПД рычага	$\eta = \frac{A_п}{A_з} = \frac{Ph}{Fs} = \frac{Pl_1}{Fl_2}$	
КПД неподвижного блока	$\eta = \frac{A_п}{A_з} = \frac{Ph}{Fs} = \frac{P}{F}$	
КПД подвижного блока	$\eta = \frac{A_п}{A_з} = \frac{Ph}{Fs} = \frac{P}{2F}$	

ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАНИКИ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

ГИДРОАЭРОСТАТИКА



Гидравлический пресс



Соединенный сосуд

Величина	Формулы	Единицы
Давление p на поверхность; $F_\perp$ — сила, действующая перпендикулярно поверхности, S — площадь поверхности	$p = \frac{F_\perp}{S}$	Па

Величина	Формулы	Единицы
Гидростатическое давление столба жидкости; $\rho_ж$ — плотность жидкости, g — ускорение свободного падения, h — высота столба жидкости	$p = \rho_ж g h$	Па
Закон Паскаля для идеальной гидравлической машины	$\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}$	
Закон соединенных сосудов	$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$	
Сила Архимеда в жидкости; $\rho_ж$ — плотность жидкости, $V_п$ — объем погруженной части тела (объем вытесненной жидкости)	$F_{арх} = \rho_ж g V_п$	Н
Сила Архимеда в газе; $\rho_г$ — плотность газа, V — объем тела	$F_{арх} = \rho_г g V$	Н
Условие плавания тела в жидкости или газе	$F_{арх} = mg$	Н

ГИДРОДИНАМИКА

Величина	Формулы	Единицы
Уравнение неразрывности струи	$S_1 v_1 = S_2 v_2$	
* *Закон Бернулли*; p — статическое давление, $\rho g h$ — гидростатическое давление, $\frac{\rho v^2}{2}$ — динамическое давление жидкости	$p + \rho g h + \frac{\rho v^2}{2} = \text{const}$	Па

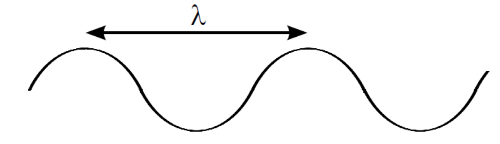
МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Величина	Формулы	Единицы
Период колебаний, N — число колебаний за интервал времени t	$T = \frac{t}{N}$	с
Частота колебаний	$\nu = \frac{N}{t} = \frac{1}{T}$	$\frac{1}{с}$
Циклическая частота колебаний	$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$	$\frac{рад}{с}$; $\frac{1}{с}$
Фаза колебаний, φ_0 — начальная фаза колебаний	$\varphi = \omega t + \varphi_0$	
Уравнение гармонических колебаний (изменение координаты со временем), x — смещение тела при колебаниях, $A = x_{max}$ — амплитуда колебаний	$x = A\cos(\omega t + \varphi_0)$ или $x = A\sin(\omega t + \varphi_0)$	
Уравнение проекции скорости при колебательном движении	$v_x = x'(t)$	
Максимальная скорость движения при гармонических колебаниях	$v_{max} = x_{max}\omega$	$\frac{м}{с}$
Уравнение проекции ускорения тела при колебательном движении	$a_x = v_x'(t) = x''(t)$ $a = -x\omega^2$	

Величина	Формулы	Единицы
Максимальное ускорение при гармонических колебаниях	$a_{max} = x_{max}\omega^2$	$\frac{м}{с^2}$
Период свободных колебаний пружинного маятника; m — масса тела, k — жесткость пружины	$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$	с
Период свободных колебаний математического маятника; длина нити маятника, g — ускорение свободного падения	$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$	с

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ



Величина	Формулы	Единицы
Длина волны λ; v — скорость волны, T и ν — соответственно период и частота волны	$\lambda = vT = \frac{v}{\nu}$	м
Скорость распространения волны; s — расстояние, пройденное волной за время t	$v = \frac{s}{t}$	$\frac{м}{с}$

ЭЛЕМЕНТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

СЛЕДСТВИЯ ПОСТУЛАТОВ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Величина	Формулы	Единицы
Релятивистский закон сложения скоростей; c — скорость света в вакууме, скорости v_1 и v_2 направлены в одну сторону	$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}$	$\frac{м}{с}$
Релятивистское сокращение длины в направлении движения; l_0 — длина тела в собственной СО; l — длина тела в СО, относительно которой оно движется со скоростью v	$l = l_0\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$	м
Релятивистское изменение хода времени; τ_0 — продолжительность события в собственной СО, τ — продолжительность того же события в неподвижной СО	$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$	с

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ДИНАМИКА

Величина	Формулы	Единицы
Энергия покоя тела; m_0 — масса покоя тела	$E_0 = m_0c^2$	Дж
Энергия тела, движущегося со скоростью v	$E = mc^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$	Дж
Полная энергия тела, движущегося со скоростью v; E_k — кинетическая энергия тела	$E(v) = E_0 + E_k$	Дж
Импульс движущегося тела	$\vec{p} = \frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$	$\frac{кг \cdot м}{с}$
Второй закон Ньютона в импульсной форме	$\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p} = \frac{\Delta(m\vec{v})}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$	

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ МОЛЕКУЛЫ

Величина	Формулы	Единицы
Молярная масса M; m_0 — масса молекулы, N_A — постоянная Авогадро	$M = m_0N_A$	$\frac{кг}{моль}$
Относительная молекулярная масса M_r; $m_0(^{12}_{6}C)$ — масса атома Карбона	$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12}m_0(^{12}_{6}C)}$	
Количество вещества (количество молей); N — количество молекул, V — объем молекул, $V_м$ — молярный объем	$\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M} = \frac{V}{V_м}$	моль
Количество вещества в смеси	$\nu = \nu_1 + \nu_2 + ... + \nu_n$	моль
Масса вещества	$m = m_0N = \nu M$	кг
Концентрация молекул	$n = \frac{N}{V}$	$\frac{1}{м^3}$
Плотность вещества	$\rho = \frac{m}{V} = nm_0$	$\frac{кг}{м^3}$

ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ ДЛЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Величина	Формулы	Единицы
Основное уравнение МКТ идеального газа (уравнение Клаузиуса); p — давление газа, $\bar{E}_k$ — средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул	$p = \frac{1}{3}nm_0\bar{v}^2$; $p = \frac{1}{3}\rho\bar{v}^2$; $p = \frac{2}{3}n\bar{E}_k$	Па
Связь между шкалами Цельсия и Кельвина	$T = (273 + t°)$	К
Связь $\bar{E}_k$ *с абсолютной температурой* T; k — постоянная Больцмана	$\bar{E}_k = \frac{3}{2}kT$	Дж
Средняя квадратичная скорость молекул; $R = kN_A$ — универсальная газовая постоянная	$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$	$\frac{м}{с}$
Давление идеального газа	$p = nkT$	Па
Давление смеси газов (закон Дальтона)	$p = p_1 + p_2 + ... + p_n$	Па
Закон Авогадро	$N = \frac{pV}{kT}$	
Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева — Клапейрона)	$pV = \frac{m}{M}RT = \nu RT$	
Объединенный газовый закон (уравнение Клапейрона)	$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2} = \text{const}$	
Закон Бойля — Мариотта для изотермического процесса	$p_1V_1 = p_2V_2$	
Закон Гей-Люссака для изобарного процесса	$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$	
Закон Шарля для изохорного процесса	$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$	

СВОЙСТВА ПАРОВ, ЖИДКОСТЕЙ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ

СВОЙСТВА ПАРОВ

Величина	Формулы	Единицы
Абсолютная влажность $\rho_а$ или $p_а$; m_{H_2O} — масса водяного пара, V — объем, R — универсальная газовая постоянная, T — абсолютная температура, M — молярная масса	$\rho_а = \frac{m_{H_2O}}{V}$ $p_а = \frac{\rho_а RT}{M}$	$\frac{кг}{м^3}$ Па
Относительная влажность; $p_{н.\,п}$ — давление насыщенного водяного пара при данной температуре, $\rho_{н.\,п}$ — его плотность	$\varphi = \frac{\rho_а}{\rho_{н.\,п}} \cdot 100\,\%$ $\varphi = \frac{p_а}{p_{н.\,п}} \cdot 100\,\%$	

СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

Величина	Формулы	Единицы
Поверхностная энергия, σ — поверхностное натяжение жидкости; S — площадь поверхности жидкости	$W_{пов} = \sigma S$	Дж
Сила поверхностного натяжения жидкости, l — длина границы поверхности жидкости	$F_{пов} = \sigma l$	Н
Работа силы поверхностного натяжения жидкости	$A = \Delta W_{пов} = \sigma \Delta S$	Дж
Высота подъема (опускания) жидкости при полном смачивании (несмачивании); ρ — плотность жидкости, R — радиус капилляра, g — ускорение свободного падения	$h = \frac{2\sigma}{\rho g R}$	м
Лапласово (избыточное) давление	$p_{изб} = \frac{2\sigma}{R}$	Па

СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Величина	Формулы	Единицы
Механическое напряжение; $F_{упр}$ — сила упругости, действующая вдоль оси стержня; S — площадь поперечного сечения стержня	$\sigma = \frac{F_{упр}}{S}$	$\frac{Н}{м^2}$
Относительное удлинение (стержня или пружины); $\Delta l = l - l_0$ — удлинение тела; l_0 и l — длина соответственно недеформированного и деформированного тела	$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$	
Жесткость пружины (стержня)	$k = \frac{ES}{l_0}$	$\frac{Н}{м}$
Закон Гука; E — модуль Юнга (модуль упругости)	$\sigma = E\lvert\varepsilon\rvert$	$\frac{Н}{м^2}$
Запас прочности, $\sigma_{п.\,п}$ — предел прочности, $\sigma_{доп}$ — допустимое механическое напряжение	$n = \frac{\sigma_{п.\,п}}{\sigma_{доп}}$	

ТЕРМОДИНАМИКА

ТЕПЛООБМЕН

Величина	Формулы	Единицы
Количество теплоты, которое поглощается при нагревании или выделяется при охлаждении; c — удельная теплоемкость; m — масса вещества; $\Delta T = \Delta t$ — изменение температуры; $C = cm$ — теплоемкость вещества	$Q = cm\Delta T = C\Delta T$	Дж
Количество теплоты, которое поглощается при плавлении или выделяется при кристаллизации; λ — удельная теплота плавления	$Q = \pm\lambda m$	Дж
Количество теплоты, которое поглощается при парообразовании или выделяется при конденсации; L — удельная теплота парообразования	$Q = \pm Lm$	Дж
Количество теплоты, которое выделяется при горении; q — удельная теплота сгорания топлива	$Q = qm$	Дж
Уравнение теплового баланса; $Q_1, Q_2, \ldots, Q_n$ — количества теплоты, полученные частями 1, 2, ..., n замкнутой системы при теплопередаче	$Q_1 + Q_2 + \ldots + Q_n = 0$	
Коэффициент полезного действия нагревателя	$\eta = \frac{Q_п}{Q_з} \cdot 100\,\%$	

ТЕРМОДИНАМИКА ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Величина	Формулы	Единицы
Внутренняя энергия идеального одноатомного газа; m — масса газа, M — молярная масса газа, R — универсальная газовая постоянная, T — абсолютная температура газа, p — давление газа, V — объем газа	$U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}RT$ $U = \frac{3}{2}pV$	Дж
Работа идеального газа при изобарном процессе (работа внешних сил $A' = -A$)	$A = p\Delta V$ $A = \frac{m}{M}R\Delta T$	Дж
Работа идеального газа при изохорном процессе	$A = 0$	Дж
Первый закон термодинамики; ΔU — изменение внутренней энергии; Q — полученное телом количество теплоты; A' — работа внешних сил; A — работа тела (газа)	$\Delta U = A' + Q$ $Q = \Delta U + A$	Дж
КПД теплового двигателя; Q_1 — количество теплоты, полученное от нагревателя; Q_2 — количество теплоты, преданная холодильнику; $A = Q_1 - Q_2$ — работа газа при расширении	$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$	

Величина	Формулы	Единицы
КПД идеального теплового двигателя, который работает по циклу Карно; $T_н$ и $T_х$ — абсолютные температуры нагревателя и холодильника соответственно	$\eta_{max} = \frac{T_н - T_х}{T_н}$	
Холодильный коэффициент; Q_1 — количество теплоты, отданное нагретому телу; Q_2 — количество теплоты, поглощенное из холодильной камеры; $A' = Q_1 - Q_2$ — работа внешних сил	$k = \frac{Q_2}{A'} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$	
Максимальный холодильный коэффициент	$k_{max} = \frac{T_х}{T_н - T_х}$	

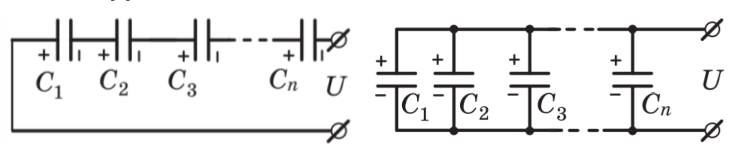
ЭЛЕКТРОСТАТИКА

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Величина	Формулы	Единицы
Закон сохранения электрического заряда	$q_1 + q_2 + \ldots + q_n = \text{const}$	Кл
Закон Кулона для точечных зарядов q_1 и q_2; F — модуль силы кулоновского взаимодействия; r — расстояние между точечными зарядами; ε_0 — электрическая постоянная	$F = k\frac{\lvert q_1\rvert\lvert q_2\rvert}{r^2}$ $F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{\lvert q_1\rvert\lvert q_2\rvert}{r^2}$	Н
Напряженность электрического поля; $\vec{F}$ — сила, с которой поле действует на точечный заряд q	$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$	$\frac{Н}{Кл}$; $\frac{В}{м}$
Напряженность поля точечного заряда в вакууме	$E = k\frac{\lvert q_0\rvert}{r^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{\lvert q_0\rvert}{r^2}$	$\frac{Н}{Кл}$; $\frac{В}{м}$
Принцип суперпозиции полей; $\vec{E}$ — напряженность электрического поля, созданного системой точечных зарядов; $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \ldots, \vec{E}_n$ — напряженности электрических полей, созданных в данной точке точечными зарядами $q_1, q_2, \ldots, q_n$	$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \ldots + \vec{E}_n$	$\frac{Н}{Кл}$; $\frac{В}{м}$
Потенциальная энергия взаимодействия точечных зарядов	$W_p = k\frac{q_1 q_2}{r}$	Дж
Потенциал электрического поля	$\varphi = \frac{W_p}{q}$	В
Потенциал поля точечного заряда	$\varphi = k\frac{q_0}{r} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{q_0}{r}$	В
Потенциал результирующего поля системы зарядов	$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \ldots + \varphi_n$	В
Разница потенциалов между двумя точками поля (напряжение)	$U = \varphi_1 - \varphi_2$	В
Работа электрического поля по перемещению заряда между двумя точками	$A = qU$ $A_{1\to2} = q(\varphi_1 - \varphi_2)$	Дж

Величина	Формулы	Единицы
Связь между разностью потенциалов и напряженностью однородного поля; d — проекция перемещения заряда на направление силовых линий поля	$U = \varphi_1 - \varphi_2 = Ed$	В
Диэлектрическая проницаемость диэлектрика; E_0 — напряженность электрического поля в вакууме, E — напряженность поля внутри диэлектрика	$\varepsilon = \frac{E_0}{E}$	

КОНДЕНСАТОРЫ



Последовательное соединение конденсаторов — Параллельное соединение конденсаторов

Величина	Формулы	Единицы
Электроемкость конденсатора; q — заряд конденсатора (модуль заряда одной его обкладки); $U = \varphi_1 - \varphi_2$ — разность потенциалов между обкладками	$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}$	Ф
Электроемкость плоского конденсатора; ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика внутри конденсатора; S — площадь одной пластины конденсатора; d — расстояние между обкладками	$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$	Ф
Энергия электрического поля конденсатора	$W_p = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$	Дж
* *Объемная плотность энергии электрического поля*; V — объем поля; E — напряженность поля	$w = \frac{W_p}{V} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}$	$\frac{Дж}{м^3}$
Законы последовательного соединения конденсаторов	$q = q_1 = q_2 = \ldots = q_n$ $U = U_1 + U_2 + \ldots + U_n$ $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots + \frac{1}{C_n}$	Кл В Ф
Законы параллельного соединения конденсаторов	$q = q_1 + q_2 + \ldots + q_n$ $U = U_1 = U_2 = \ldots = U_n$ $C = C_1 + C_2 + \ldots + C_n$	Кл В Ф

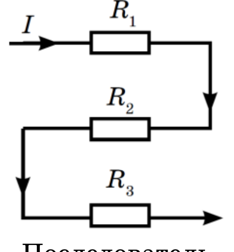
ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

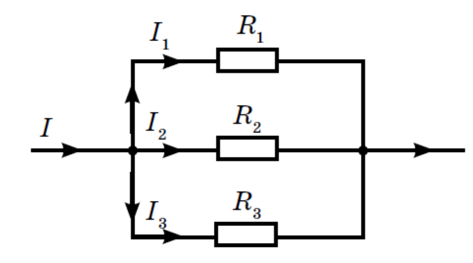
Величина	Формулы	Единицы
Сила тока I; q — электрический заряд, проходящий через поперечное сечение проводника за время t	$I = \frac{q}{t}$	А
Напряжение U; A — работа электрического поля по перемещению по участку заряда q	$U = \frac{A}{q}$	В

Величина	Формулы	Единицы
Сопротивление проводника R; ρ — удельное сопротивление; l — длина проводника; S — площадь поперечного сечения проводника	$R = \rho \dfrac{l}{S}$	Ом

УЧАСТОК ЦЕПИ



Последовательное соединение проводников



Параллельное соединение проводников

Величина	Формулы	Единицы
Закон Ома для участка цепи; I — сила тока в проводнике; U — разность потенциалов (напряжение) на концах проводника; R — электрическое сопротивление проводника	$I = \dfrac{U}{R}$	А
Законы последовательного соединения проводников	$I = I_1 = I_2 = ... = I_n$ $U = U_1 + U_2 + ... + U_n$ $R = R_1 + R_2 + ... + R_n$	А В Ом
Законы параллельного соединения проводников	$I = I_1 + I_2 + ... + I_n$ $U = U_1 = U_2 = ... = U_n$ $\dfrac{1}{R} = \dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2} + ... + \dfrac{1}{R_n}$	А В Ом
Работа электрического тока; $q = It$ — заряд, который проходит по участку за время t; U — напряжение на участке цепи	$A = qU = UIt$	Дж
Закон Джоуля — Ленца; Q — количество теплоты, выделяющейся в проводнике сопротивлением R при стиле тока I в течение времени t	$Q = I^2Rt$	Дж
Мощность тока	$P = \dfrac{A}{t} = UI$	Вт
Мощность тока для участка цепи без сторонних сил	$P = UI = I^2R = \dfrac{U^2}{R}$	Вт

ЗАМКНУТАЯ ЦЕПЬ

Величина	Формулы	Единицы
Электродвижущая сила (ЭДС); $A_{ст}$ — работа сторонних сил при перемещении по участку цепи заряда q	$\mathcal{E} = \dfrac{A_{ст}}{q}$	В
Закон Ома для полной (замкнутой) цепи; R и r — соответственно внутреннее сопротивление источника тока и сопротивление внешней цепи	$I = \dfrac{\mathcal{E}}{R + r}$	А
Следствие из закона Ома для полной (замкнутой) цепи	$U = \mathcal{E} - Ir$	В
Сила тока при коротком замыкании	$I_{к.з} = \dfrac{\mathcal{E}}{r}$	А

Величина	Формулы	Единицы
КПД источника тока; $P_п = UI$ — полезная мощность, $P_з = \mathcal{E}I$ — полная (затраченная) мощность	$\eta = \dfrac{P_п}{P_з} = \dfrac{U}{\mathcal{E}}$	

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

Величина	Формулы	Единицы
Сила тока I; e — заряд свободной заряженной частицы, n — концентрация таких частиц, $\bar{v}$ — средняя скорость упорядоченного движения таких частиц, S — площадь поперечного сечения проводника	$I = n\|e\|\bar{v}S$	А
Зависимость сопротивления R *(удельного сопротивления* ρ*) от температуры* t; R_0, ρ_0 — соответственно сопротивление и удельное сопротивление проводника при температуре 0 °С; α — *температурный коэффициент сопротивления.*	$R = R_0(1 + \alpha t)$ $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$	Ом Ом · м
Первый закон электролиза; m — масса вещества, которое выделилось при электролизе; k — электрохимический эквивалент вещества; $q = It$ — заряд, прошедший через электролит	$m = kq = kIt$	кг
Второй закон электролиза; k — электрохимический эквивалент вещества; M — молярная масса вещества; n — модуль заряда иона в элементарных электрических зарядах (валентность вещества); $F = \|e\|N_A$ — постоянная Фарадея	$k = \dfrac{M}{Fn}$	$\dfrac{кг}{Кл}$
Условие ионизации электронным ударом; E_k — кинетическая энергия электрона; $A_{вых}$ — работа выхода электрона из металла	$E_k \geqslant A_{вых}$	

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Величина	Формулы	Единицы
Сила Ампера, действующая на проводник с током со стороны магнитного поля; B — магнитная индукция поля; I — сила тока; l — длина проводника; α — угол между магнитной индукцией и направлением тока	$F_A = BIl\sin\alpha$	Н

Величина	Формулы	Единицы
Момент сил Ампера, действующих на плоский замкнутый контур, расположенный в однородном магнитном поле; S — площадь контура; N — количество витков в рамке; α — угол между магнитной индукции и нормалью к плоскости контура	$M = NBIS\sin\alpha$	Н · м
Сила Лоренца, действующая на движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля; q — заряд частицы; v — скорость движения частицы; α — угол между магнитной индукцией и направлением движения частицы	$F_Л = B\|q\|v\sin\alpha$	Н
Индукция результирующего магнитного поля (принцип суперпозиции магнитных полей)	$\vec{B}=\vec{B}_1+\vec{B}_2+...+\vec{B}_n$	Тл
Магнитная проницаемость вещества; B_0 и B — магнитные индукции поля, которое создается одним и тем же током соответственно в вакууме и в веществе	$\mu = \dfrac{B}{B_0}$	
Магнитный момент p_m для плоского контура с током I; S — площадь контура	$p_m = IS$	А · м^2

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Величина	Формулы	Единицы
Магнитный поток через замкнутый контур; B — магнитная индукция поля; S — площадь контура; α — угол между магнитной индукции и нормалью к плоскости контура	$\Phi = BS\cos\alpha$	Вб
Закон электромагнитной индукции; $\mathcal{E}_i$ — ЭДС индукции в контуре; $\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ — скорость изменения магнитного потока; N — количество витков в контуре	$\mathcal{E}_i = -N\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ $\mathcal{E}_i = -N\Phi'(t)$	В
Индукционный ток I_i; R — сопротивление проводника	$I_i = \dfrac{\mathcal{E}_i}{R}$	А
ЭДС индукции в проводнике длиной l, который движется со скоростью v в магнитном поле; B — магнитная индукция поля; α — угол между движением проводника и индукцией магнитного поля	$\mathcal{E}_i = Bvl\sin\alpha$	В
Индуктивность L замкнутого контура; Φ — магнитный поток через замкнутый контур, обусловленный протеканием в контуре тока, если сила тока равна I	$L = \dfrac{\Phi}{I}$	Гн
ЭДС самоиндукции; $\dfrac{\Delta I}{\Delta t}$ — скорость изменения силы тока	$\mathcal{E}_{is} = -L\dfrac{\Delta I}{\Delta t}$ $\mathcal{E}_{is} = -LI'(t)$	В
Энергия магнитного поля тока	$W_м = \dfrac{LI^2}{2}$	Дж

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

СВОБОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Величина	Формулы	Единицы
Уравнение колебаний заряда q; q_{max} — заряд, который предоставлен конденсатору, амплитуда колебаний заряда; ω — циклическая частота свободных колебаний	$q = q_{max}\cos\omega t$	Кл
Уравнение колебаний напряжения u; $U_{max} = \dfrac{q_{max}}{C}$ — амплитуда колебаний напряжения	$u = U_{max}\cos\omega t$	В
Уравнение колебаний силы тока i; $I_{max} = q_{max}\omega$ — амплитуда колебаний силы тока	$i = -I_{max}\sin\omega t$ $i = q'(t)$	А
Формула Томсона для колебательного контура; T — период свободных колебаний в колебательном контуре; L — индуктивность катушки; C — электроемкость конденсатора	$T = 2\pi\sqrt{LC}$	с
Частота ν свободных электромагнитных колебаний в колебательном контуре	$\nu = \dfrac{1}{T} = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$	$\dfrac{1}{с}$
Циклическая частота свободных колебаний в колебательном контуре	$\omega = 2\pi\nu = \dfrac{2\pi}{T} = \dfrac{1}{\sqrt{LC}}$	$\dfrac{рад}{с}$; $\dfrac{1}{с}$
Превращение энергии в колебательном контуре	$W_{эл_{max}} = W_{м_{max}} = W_{эл} + W_м$	Дж
Полная энергия контура	$W = \dfrac{q^2}{2C} + \dfrac{Li^2}{2}$	Дж

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

Величина	Формулы	Единицы
Вынужденные электромагнитные колебания; e —мгновенное значение ЭДС; $\mathcal{E}_{max} = NBS\omega$ — амплитудное значение ЭДС; ω — циклическая частота переменной ЭДС	$e = \mathcal{E}_{max}\sin\omega t$ $e = -N\Phi'(t)$	В
Уравнение изменения со временем магнитного потока при равномерном вращении рамки в магнитном поле	$\Phi = BS\cos\omega t$	Вб
Действующее значение силы тока	$I = \dfrac{I_{max}}{\sqrt{2}}$	А
Действующее значение напряжения	$U = \dfrac{U_{max}}{\sqrt{2}}$	В
Действующее значение ЭДС	$\mathcal{E} = \dfrac{\mathcal{E}_{max}}{\sqrt{2}}$	В
* *Полное сопротивление Z (импеданс) цепи переменного тока*; R — активное сопротивление; $X_L = \omega L$ — индуктивное сопротивление; $X_C = \dfrac{1}{\omega C}$ — емкостное сопротивление	$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$	Ом

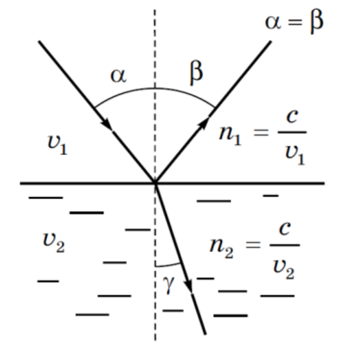
Величина	Формулы	Единицы
Коэффициент трансформации k трансформатора; e_1 и e_2 — ЭДС самоиндукции соответственно в первичной и вторичной обмотке; $\mathscr{E}_1$ и $\mathscr{E}_2$ — действующее значение ЭДС в соответствующей обмотке; N_1 и N_2 — количество витков в соответствующей обмотке	$k = \frac{e_1}{e_2} = \frac{\mathscr{E}_1}{\mathscr{E}_2} = \frac{N_1}{N_2}$	
Превращение напряжения трансформатора в режиме холостого хода; U_1 и U_2 — действующее значение напряжения в соответствующей обмотке	$k = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{\mathscr{E}_1}{\mathscr{E}_2} = \frac{N_1}{N_2}$	
Превращение силы тока нагруженным трансформатором; I_1 и I_2 — действующее значение силы тока в соответствующей обмотке	$k = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{\mathscr{E}_1}{\mathscr{E}_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$	
КПД трансформатора; $P_2 = U_2 I_2$ — мощность потребителя; $P_1 = U_1 I_1$ — мощность трансформатора	$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1}$	

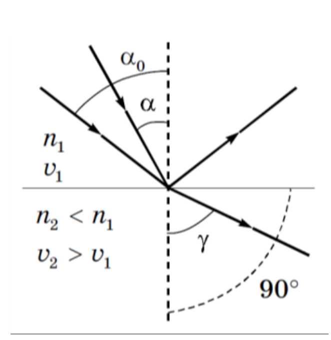
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Величина	Формулы	Единицы
Условие существования электромагнитной волны; $\vec{E}$ — напряженность электрического поля; $\vec{B}$ — магнитная индукция магнитного поля; $\vec{v}$ — скорость электромагнитных волн (скорость света) в вакууме	$\vec{E} \perp \vec{B} \perp \vec{v}$	
Длина λ электромагнитной волны; T и ν — соответственно период и частота волны	$\lambda = vT = \frac{v}{\nu}$	м
Скорость распространения электромагнитной волны; s — расстояние, пройденное волной за время t	$v = \frac{s}{t}$	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$
Расстояние s от объекта; c — скорость распространения света; t — время прохождения импульса до цели и обратно	$s = \frac{ct}{2}$	м
Минимальное расстояние s_{min} обнаружения объекта; τ — длительность импульса	$s_{min} = \frac{c\tau}{2}$	м
Максимальное расстояние s_{max} обнаружения объекта; t_0 — интервал времени между импульсами; ν_0 — частота ссылки импульса	$s_{max} = \frac{ct_0}{2} = \frac{c}{2\nu_0}$	м
Количество колебаний в одном импульсе; τ — длительность импульса; T — период колебаний; ν — частота колебаний	$N = \frac{\tau}{T} = \tau\nu$	
Мощность одного импульса; W_0 — энергия одного импульса	$P_0 = \frac{W_0}{t_0}$	Вт

ОПТИКА

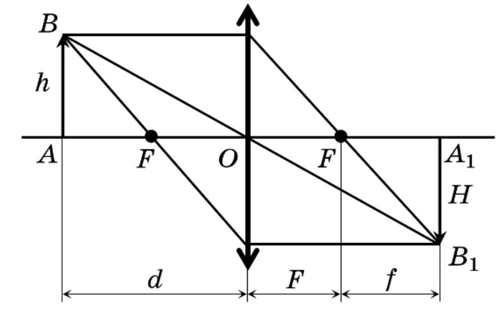
ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА





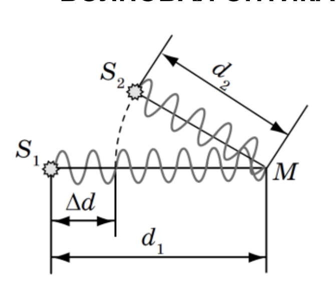
Величина	Формулы	Единицы
Абсолютный показатель преломления среды; c — скорость света в вакууме; v — скорость света в среде	$n = \frac{c}{v}$	
Относительный показатель преломления двух сред	$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$	
Закон отражения света; α и β — соответственно угол падения и угол отражения света	$\alpha = \beta$	
Закон преломления света; γ — угол преломления света	$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = n_{21}$	
Полное внутреннее отражение света; α_0 — предельный угол полного отражение на границе двух сред	$\sin\alpha_0 = n_{21}$	

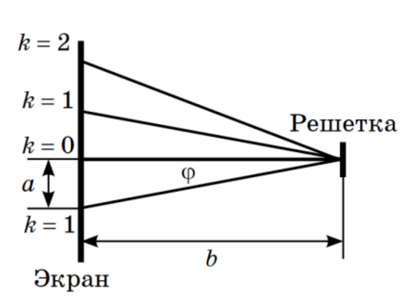
ХОД ЛУЧЕЙ В ЛИНЗЕ



Величина	Формулы	Единицы
Оптическая сила линзы; F — фокусное расстояние линзы	$D = \frac{1}{F}$	дптр
Оптическая сила n соприкасающихся линз	$D = D_1 + D_2 + \ldots + D_n$	дптр
Формула тонкой линзы; $D > 0$ и $F > 0$ для собирающей линзы, $D < 0$ и $F < 0$ для рассеивающей линзы; d — расстояние между линзой и предметом; f — расстояние между линзой и изображением ($f > 0$ для действительного изображения, $f < 0$ для мнимого изображения).	$D = \frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$	дптр
Линейное увеличение линзы; H — линейный размер изображения предмета; h — линейный размер самого предмета	$\Gamma = \frac{H}{h} = \left\lvert \frac{f}{d} \right\rvert$	

ВОЛНОВАЯ ОПТИКА





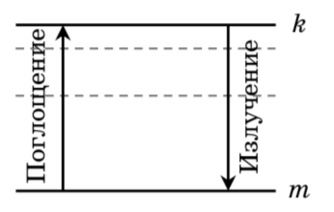
Величина	Формулы	Единицы
Зависимость между относительным показателем преломления и длиной волны	$n_{21}=\frac{v_1}{v_2}=\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$	
Оптическая разница путей двух волн	$\Delta d=\lvert d_1-d_2\rvert$	м
Условие наблюдения интерференционных максимумов; λ — длина световой волны в среде; k — целое число	$\Delta d=k\lambda=2k\frac{\lambda}{2}$	м
Условие наблюдения интерференционных минимумов	$\Delta d=(2k+1)\frac{\lambda}{2}$	м
Период дифракционной решетки; a — ширина непрозрачного участка (в прозрачных решетках) или полосы, которые рассеивает свет (в отражательных решетках); D — ширина прозрачного участка (или полосы, отражающей свет); N — количество штрихов на отрезке длиной l	$d=a+D=\frac{l}{N}$	м
Формула дифракционной решетки; d — период дифракционной решетки; φ — угол отклонения света; k — порядок максимума (целое число); λ — длина световой волны	$d\sin\varphi=k\lambda$	м
Закон Брюстера; α_B — угол, при котором отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны	$\operatorname{tg}\alpha_B=n_{21}$	

КВАНТОВАЯ ОПТИКА

Величина	Формулы	Единицы
Энергия фотона; h — постоянная Планка; ν — частота электромагнитного излучения; c — скорость света; λ — длина световой волны	$E=h\nu=\frac{hc}{\lambda}$	Дж
Импульс p фотона	$p=\frac{E}{c}=\frac{h\nu}{c}=\frac{h}{\lambda}$	$\frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{с}}$
Мощность излучения фотонов за время t; $W=Nh\nu$ — энергия N количества электронов	$P=\frac{W}{t}=\frac{Nh\nu}{t}$	Вт
Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта; $A_{\text{вых}}=h\nu_{\min}$ — работа выхода; $\nu_{\min}=\frac{c}{\lambda_{\max}}$ — красная граница фотоэффекта; $E_{k\max}=\lvert e\rvert U_з=\frac{m_e v_{\max}^2}{2}$ — максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов; $U_з$ — задерживающее напряжение	$E=A_{\text{вых}}+E_{k\max}$	Дж

АТОМ И АТОМНОЕ ЯДРО

АТОМНАЯ ФИЗИКА



Величина	Формулы	Единицы
Энергия фотона, которую излучает атом (второй постулат Бора); $h\nu$ — энергия кванта; E_k — энергия начального состояния атома; E_m — энергия состояния, в которое перешел атом	$h\nu=\lvert E_k-E_m\rvert$	Дж
Число нейтронов в ядре; A — массовое (нуклонное) число атома; Z — протонное (зарядовое) число	$N=A-Z$	

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Величина	Формулы	Единицы
Дефект масс ядра; Z и N — количества соответственно протонов и нейтронов в ядре; m_p, m_n и $m_я$ — массы протона, нейтрона и ядра соответственно	$\Delta m=(Zm_p+Nm_n)-m_я$	а. е. м
Энергия связи атомного ядра; Δm — дефект масс ядра	$E_{\text{св}}=\Delta mc^2$	МэВ
Удельная энергия связи; A — массовое (нуклонное) число атома	$f=\frac{E_{\text{св}}}{A}$	$\frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$
Энергия выхода ядерной реакции; m_1 — масса частиц до реакции; m_2 — масса частиц после реакции	$E_{\text{вых}}=(m_1-m_2)c^2$	МэВ
Активность радионуклидного источника; ΔN — количество распадов за время Δt; N — число атомов радионуклида в образце на данный момент времени; λ — постоянная радиоактивно распада радионуклида	$A=\frac{\Delta N}{\Delta t}=\lambda N$	Бк
Закон радионуклидного распада; N — количество ядер радионуклида, которые остались в образце через время t; N_0 — начальное количество ядер; T — период полураспада; t — время распада	$N=N_0\cdot 2^{-\frac{t}{T}}$	
Поглощенная доза ионизирующего излучения; E — энергия ионизирующего излучения; m — масса вещества	$D=\frac{E}{m}$	Гр
Эквивалентная доза ионизирующего излучения; K — коэффициент качества, характеризующий опасность данного вида излучения	$H=K\cdot D$	Зв

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Физика: учебник для 7 кл. общеобразоват. учеб. заведений / [В. Г. Барьяхтар, С. А. Довгий, Ф. Я. Божинова и др.]; под ред. В. Г. Барьяхтара, С. А. Довгого. — Харьков: Изд-во «Ранок», 2015.
2. Физика: учебник для 8 кл. общеобразоват. учеб. заведений / [В. Г. Барьяхтар, С. А. Довгий, Ф. Я. Божинова, Е. А. Кирюхина]; под ред. В. Г. Барьяхтара, С. А. Довгого. — Харьков: Изд-во «Ранок», 2016.
3. Физика: учебник для 9 кл. общеобразоват. учеб. заведений / [В. Г. Барьяхтар, С. А. Довгий, Ф. Я. Божинова, Е. А. Кирюхина]; под ред. В. Г. Барьяхтара, С. А. Довгого. — Харьков: Изд-во «Ранок», 2017.
4. Физика: учебник для 9 кл., общеобразоват. учеб. заведений / [Ф. Я. Божинова, Н. М. Кирюхин, Е. А. Кирюхина]. — Харьков: Изд-во «Ранок», 2009.
5. Физика (уровень стандарта, по учебной программе авторского коллектива под руководством Локтева В. М.): учеб. для 10 кл. заведений общ. сред. образования / [В. Г. Барьяхтар, С. А. Довгий, Ф. Я. Божинова, Е. А. Кирюхина]; под ред. В. Г. Барьяхтара, С. А. Довгого. — Харьков: Изд-во «Ранок», 2018.
6. Физика (академический уровень) учеб. для 10 кл. заведений общ. сред. образования / [В. Г. Барьяхтар, Ф. Я. Божинова]. — Харьков: Изд-во «Ранок», 2010.
7. Физика (уровень стандарта, по учебной программе авторского коллектива под руководством Локтева В. М.): учеб. для 11 кл. заведений общ. сред. образования / [В. Г. Барьяхтар, С. А. Довгий, Ф. Я. Божинова, Е. А. Кирюхина]; под ред. В. Г. Барьяхтара, С. А. Довгого. — Харьков: Изд-во «Ранок», 2019.
8. Физика (академический уровень, профильный уровень) учеб. для 11 кл. заведений общ. сред. образования / [В. Г. Барьяхтар, Ф. Я. Божинова, Н. М. Кирюхин, Е. А. Кирюхина]. — Харьков: Изд-во «Ранок», 2011.
9. Физика: комплексная подготовка к внешнему независимому оцениванию / [Н. Струж, В. Мацюк, С. Остапюк]. — Тернополь: Изд-во «Підручники і посібники», 2016.
10. Физика: практический справочник / [К. Э. Немченко, Е. В. Дудинова]. — 2-е изд. — Харьков: Изд-во «Весна», 2011.
11. Физика: комплексное издание / [М. О. Алешина, Г. С. Богданова, Ф. Я. Божинова, Л. А. Кирик, Ю. А. Соколович]. — Киев: Изд-во «Літера ЛТД», 2015.
12. Физика: карманный справочник / [Ю. А. Соколович, Г. С. Богданова]. — 5-е изд. — Харьков: Изд-во «Ранок», 2011.
13. Физика в определениях, таблицах и схемах. 7–11 классы / [Ю. Е. Крот.] — 9-е изд. — Харьков: Изд-во «Ранок», 2014 (Серия «Спасатель»).
14. Интернет-ресурс: http://vedy.by/Vedy/Home/PartitionView/17260.